

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HERMANOS SAIZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

***DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE
LA UNIDAD DE SELECCIÓN MINERA EN LA EXACTITUD Y
PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DEL
YACIMIENTO "MARIEL"***

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Autor: Ing. Orestes Gómez González

Tutor: Dr. C. José Quintín Cuador Gil

Pinar del Río, 2007

DEDICATORIA.-

DEDICO ESTE TRABAJO, A LA GRAN PATRIA DE TODOS LOS CUBANOS, A MI CUBA, A MI MADRE QUERIDA ZOILA DELIA, QUE ME DIO LA VIDA Y ME ENSEÑO TODO LO QUE UN HOMBRE NECESITA PARA CAMINAR POR EL MUNDO, SIN TEMOR AL FRACASO, A MI PADRE, ORESTES JUAN QUE SIEMPRE NOS APOYO Y LUCHO CON MANOS Y DIENTES POR TODOS NOSOTROS, A MIS HERMANOS, MARITZA, NADE, MARU Y RAPHA, QUE SIEMPRE HAN SIDO FIELES, A MIS HIJOS DE MI ALMA Y MI CORAZÓN, DAGOBERTO, LAURA ELENA Y ORESTES DAVID, QUE SON EL REGALO MAS GRANDE QUE LA NATURALESA ME DIÓ Y POR ÚLTIMO Y NO POR ESO MENOS IMPORTANTE A MI ESPOSA AMADA, MARÍA ELENA, LA MÁS LINDA Y BUENA, COMPAÑERA SIN PAR, QUE HA SABIDO RESISTIR Y SACRIFICARCE POR MI SUPERACIÓN, ENFRENTANDO CON VALENTIA LOS MALOS DÍAS Y CUBRIENDOME, CON MUCHO AMOR, LA ESPALDA.

AGRADECIMIENTOS

QUIERO AGRADECER CON MUCHA HUMILDAD, TODO EL APOYO INCONDICIONAL DE MIS ETERNOS AMIGOS JOSÉ DE LUZ, CLAUDIO AGRAMONTE, FÉLIX GONZÁLEZ, RAFAEL Y FRANCISCO ALABA, A LOS HERMANOS JOSÉ, A MIS QUERIDAS VIEJITAS ALICIA, MARIANA, DOMINGA Y FRANCISCA POR SUS CUIDADOS Y AMOR MATERNAL, A MIS HERMANOS DE SIEMPRE ELMIDIO ESTÉVEZ CRUZ Y MI TUTOR JOSÉ QUINTÍN CUADOR GIL, MAESTROS Y AMIGOS SIEMPRE, A LOS QUE LES DEBO MUCHO Y CASI TODO LO QUE SÉ COMO PROFESIONAL, PORQUE SIN ELLOS NO ESTARÍA ESCRIBIENDO ESTO, GRACIAS AMIGOS POR EXISTIR. AL COLEGA Y COMPAÑERO DE ESTUDIOS JOSÉ ARIAS DEL TORO POR SU CONTRIBUCIÓN A ESTA TESIS CON SU PROGRAMA “CELDA 3D”, QUE FUE DESICIVO EN LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO. A LOS PUEBLOS INDÍGENAS DE AMÉRICA Y ÁFRICA PORQUE DE AHÍ VIENEN MIS RAICES. Y POR ÚLTIMO, A JOSÉ MARTÍ Y PÉREZ Y AL MAYOR GENERAL, ANTONIO MACEO Y GRAJALES, NUESTRO QUERIDO TITÁN DE BRONCE, POR SUS EJEMPLOS IMPERSEDEROS DE INTELIGENCIA, CORAJE Y AMOR A LA PATRIA.

RESUMEN.-

LA PRECISIÓN Y EXACTITUD EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES EN UNO DE LOS TEMAS MÁS IMPORTANTES EN LA INDUSTRIA GEÓLOGO - MINERA. EL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS AUTOMATIZADOS EN ESTE CAMPO HA PERMITIDO UN INCREMENTO EN LA CALIDAD DE LAS ESTIMACIONES EN DIFERENTES TIPOS DE YACIMIENTOS. EN ESTE CASO EXISTEN ELEMENTOS DE CARÁCTER OBJETIVO QUE INFLUYEN DIRECTAMENTE EN LA PRECISIÓN Y EXACTITUD DE LOS CÁLCULOS, COMO ES EL TAMAÑO DE LA UNIDAD DE SELECCIÓN MINERA (USM). PARA LA SELECCIÓN DE LA MISMA SE HAN UTILIZANDO CRITERIOS RELACIONADOS, CON CARÁCTER ECONÓMICOS, REQUERIMIENTOS MINEROS, ETC.

EN ESTE TRABAJO SE DEMUESTRA LA INFLUENCIA DE LA USM EN LA PRECISIÓN Y EXACTITUD DE LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS. CON LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA REALIZADA SE CONSTATA QUE EL TEMA NO HA SIDO TRATADO SUFICIENTEMENTE Y NO EXISTEN RESULTADOS CONCLUYENTES AL RESPECTO. SE PROPONE UNA METODOLOGÍA QUE UTILIZAN PROCEDIMIENTOS CONJUNTOS DE ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA PARA PROPONER POSIBLES VALORES REALES, REALIZAR ESTIMACIONES TANTO LOCALES COMO GLOBALES Y COMPARAR LAS DIFERENCIAS A TRAVÉS DEL ERROR MEDIO, EL ERROR MEDIO PORCENTUAL Y EL ERROR CUADRÁTICOS MEDIO. EL PROCEDIMIENTO SE APLICA AL YACIMIENTO PARA CEMENTO MARIEL. LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEMUESTRAN LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LA USM EN LAS ESTIMACIONES TANTO A NIVEL LOCAL COMO GLOBAL. EN ESTE CASO PARTICULARMENTE SE APRECIA QUE PARA EL TAMAÑO DE USM DE 25x25x10 M LOS VALORES DE ERROR SON MÍNIMOS, TAMAÑO QUE COINCIDE CON LA MITAD DE LA RED DE EXPLORACIÓN, LO ANTERIOR PERMITE CUMPLIR CON EL OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN Y RECOMENDAR SU APLICACIÓN A OTROS CASOS DE ESTUDIO.

ÍNDICE

DEDICATORIA.-	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.-	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	VIII
INTRODUCCIÓN.-	1
CAPÍTULO I.- REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.-	I-8
I.1.- INTRODUCCIÓN.-	I-8
I.2.- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS CLÁSICOS DE ESTIMACIÓN.-	I-9
I.3.- ACTUALIDAD DE LA METODOLOGÍA AUTOMATIZADA DE ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES.-	I-14
I.4.- REPERCUSIÓN DEL TAMAÑO DE LA UNIDAD DE SELECCIÓN MINERA (USM) EN LA EXACTITUD Y LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS.-	I-19
I.5.- CONCLUSIONES.-	I-25
CAPÍTULO II.- GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MARIEL.-	II-26
II.1.- INTRODUCCIÓN.-	II-26
II.2.- LOCALIZACIÓN, TOPOGRAFÍA, CLIMA Y CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS – SOCIALES DE LA REGIÓN.-	II-26
II.2.1.- LOCALIZACIÓN.-	II-26
II.2.2.- TOPOGRAFÍA.-	II-27
II.2.3.- CLIMA.-	II-27
II.2.4.- HIDROGRAFÍA.-	II-27
II.2.5.- CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS – SOCIALES DE LA REGIÓN.-	II-28

II.2.5.1.- Industria.-	II-28
II.2.5.2.- Condiciones de transporte y abastecimiento de agua.-	II-28
II.3.- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL YACIMIENTO Y DE SUS ROCAS ENCAJANTES.----	II-29
II.3.1.- TECTÓNICA.-	II-31
II.3.2.- GÉNESIS DEL YACIMIENTO.-	II-31
II.3.3.- CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS.-	II-32
II.3.3.1.- Generalidades.-	II-32
II.3.3.2.- Características hidrogeológicas de la región.-	II-33
CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA.-	III-35
III.1.- INTRODUCCIÓN.-	III-35
III.2.- ELEMENTOS PARA LA APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA.-	III-35
III.3.- CONOCIMIENTO DEL PROBLEMA.-	III-36
III.3.1.- ESTUDIO GEOLÓGICO DEL PROBLEMA.-	III-38
III.3.2.- INFORMACIÓN DE EXPLORACIÓN.-	III-39
III.3.3.- CORRECCIÓN NUMÉRICA DE LA INFORMACIÓN EN SOPORTE MAGNÉTICO.-	III-40
III.3.4.- REGULARIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN.-	III-40
III.3.5.- ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS.-	III-41
III.4.- EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.-	III-41
III.4.1.- CÁLCULO DEL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL.-	III-41
III.4.1.1.- Cálculo de semivariogramas medio o globales.-	III-42
III.4.1.2.- Cálculo de semivariogramas direccionales.-	III-43
III.4.1.3.- Análisis de anisotropías.-	III-43
III.4.1.4.- Cálculo del semivariograma vertical.-	III-43
III.4.2.- EL AJUSTE DE MODELOS TEÓRICOS.-	III-44

III.4.2.1.- Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental.-	III-44
III.4.2.2.- Validación del modelo ajustado.-	III-45
III.5.- ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN.-	III-45
III.5.1.- ESTIMACIÓN.-	III-45
III.5.1.1.- Geoestadística Lineal.-	III-46
III.5.2.- SIMULACIÓN.-	III-46
III.5.2.1.- Simulación Condicional.-	III-47
III.6.- TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS GEOESTADÍSTICOS.-	III-48
III.7.- SISTEMAS PARA EL PROCESAMIENTO GEOESTADÍSTICO.-	III-48
III.8.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.-	III-51
CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.-	IV-52
IV.1.- INTRODUCCIÓN.-	IV-52
IV.1.1.- GENERALIDADES Y FUENTE DE LOS DATOS DISPONIBLES.-	IV-52
IV.1.2.- DATOS Y SECTOR DE TRABAJO UTILIZADOS.-	IV-53
IV.1.3.- PERFORACIÓN, MÉTODOS DE MUESTREO, ANÁLISIS BÁSICOS Y DE CONTROL.-	IV-55
IV.1.3.1.- Perforación.-	IV-55
IV.1.3.2.- Muestreo.-	IV-55
IV.1.3.3.- Análisis básicos y de control.-	IV-55
IV.1.4.- LÍMITES FÍSICOS DEL MODELO GEOLÓGICO DEL SECTOR DEL YACIMIENTO UTILIZADO.-	IV-56
IV.1.4.1.- Obtención del sólido tridimensional de los recursos.-	IV-57
IV.1.5.- MODELO DIGITAL DEL TERRENO.-	IV-58
IV.1.5.1.- Introducción.-	IV-58
IV.1.5.2.- Confección del modelo digital del terreno.-	IV-59
IV.1.6.- ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.-	IV-59

IV.1.7.- ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS Y VARIOGRAFÍA EXPLORATORIA.-	IV-62
IV.1.8.- MODELO DE RECURSOS.-	IV-64
IV.1.8.1.- Metodología de estimación.-	IV-65
IV.1.8.2.- Parámetros de la estimación de recursos.-	IV-66
IV.2.- APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA.-	IV-66
IV.2.1.- INTRODUCCIÓN.-	IV-66
IV.2.2.- NORMALIZACIÓN DEL HISTOGRAMA.-	IV-67
IV.2.3.- PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN SECUENCIAL GAUSSIANA.-	IV-67
IV.2.4.- VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA.-	IV-69
IV.2.5.- POSIBLES DATOS REALES.-	IV-70
IV.3.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.-	IV-71
IV.4.- CONCLUSIONES.-	IV-73
IV.5.- RECOMENDACIONES.-	IV-75
BIBLIOGRAFÍA.-	IV-76

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla IV-1 Campañas de perforación en el yacimiento.-</i>	<i>IV-52</i>
<i>Tabla IV-2 Tabla de coordenadas para la estimación.-</i>	<i>IV-53</i>
<i>Tabla IV-3 Secciones transversales.-</i>	<i>IV-56</i>
<i>Tabla IV-4 Estadística descriptiva del CaO.-</i>	<i>IV-60</i>
<i>Tabla IV-5 Frecuencia acumulativa del CaO.-</i>	<i>IV-60</i>
<i>Tabla IV-6 Parámetros para el cálculo de los semivariogramas.-</i>	<i>IV-62</i>
<i>Tabla IV-7 Características de los modelos de bloques.-</i>	<i>IV-64</i>
<i>Tabla IV-8 Coordenadas del sector simulado.-</i>	<i>IV-66</i>
<i>Tabla IV-9 Tabla de comparación de los estadígrafos de los datos reales y los simulados.-</i>	<i>IV-70</i>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico IV-1 Límites de las áreas de trabajo.-</i>	<i>IV-54</i>
<i>Gráfico IV-2 Pozos utilizados en el desarrollo de este trabajo.-</i>	<i>IV-54</i>
<i>Gráfico IV-3 Límites físicos de modelo geológico. Perfil No. 354200N</i>	<i>IV-56</i>
<i>Gráfico IV-4 Tied polyline para confeccionar el sólido tridimensional.-</i>	<i>IV-57</i>
<i>Gráfico IV-5 Sólido tridimensional de los recursos.-</i>	<i>IV-58</i>
<i>Gráfico IV-6 Modelo digital del terreno.-</i>	<i>IV-59</i>
<i>Gráfico IV-7 Histograma para el Carbonato de Calcio (CaO).-</i>	<i>IV-61</i>
<i>Gráfico IV-8 Semivariogramas del CaO.-</i>	<i>IV-62</i>
<i>Gráfico IV-9 Semivariograma de CaO ajustado y modelo estructural obtenido.-</i>	<i>IV-63</i>
<i>Gráfico IV-10 Modelo de bloques.-</i>	<i>IV-65</i>
<i>Gráfico IV-11 Área escogida para la simulación secuencial gaussiana.-</i>	<i>IV-66</i>
<i>Gráfico IV-12 Representación en 3D de los resultados de la simulación.-</i>	<i>IV-69</i>
<i>Gráfico IV-13 Comparación entre los histogramas de los datos reales y los simulados para el CaO.-</i>	<i>IV-69</i>
<i>Gráfico IV-14 Semivariogramas de los datos reales y los simulados.-</i>	<i>IV-70</i>
<i>Gráfico IV-15 Error cuadrático medio.-</i>	<i>IV-71</i>
<i>Gráfico IV-16 Diferencias entre valores estimados por Krigeaje vs. promedios móviles de la Simulación.-</i>	<i>IV-72</i>

INTRODUCCIÓN.-

En la actualidad se han desarrollado los métodos automatizados para la estimación de recursos minerales, los mismos han permitido la aplicación de métodos modernos de estimación como son los geomatemáticos y en particular los geoestadísticos. Consecuentemente se ha incrementado la precisión y exactitud de los estimados y la utilización de estos métodos a tomado auge en empresas, instituciones científicas y universitarias. Aun cuando se ha constatado un desarrollo vertiginoso en el procesamiento automatizado de la información en el campo de las geociencias y en particular en la Geología y la Minería, existen elementos de carácter objetivo que no permiten un incremento en la precisión y exactitud de los estimados. Tal es el caso de la selección del tamaño de la Unidad de Selección Minera (USM).

En la actualidad se utilizan en nuestro país, fundamentalmente, métodos clásicos en la estimación de recursos minerales sólidos, aun cuando como planteamos anteriormente, desde hace décadas se implementaron y se han desarrollado, los sistemas automatizados, en los cuales inicialmente se define un modelo geométrico, que posteriormente es empleado para aplicar control geológico a la estimación. La principal diferencia entre los métodos que actualmente se utilizan en la estimación de recursos minerales radica en la utilización o no de las características de variabilidad y correlación espacial entre las muestras o datos.

En los métodos clásicos no se tienen en cuenta los pesos de las muestras de una forma racional y/o adecuada, los pesos de las muestras se asignan sobre la base de consideraciones geométricas y sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los parámetros estudiados. En ellos la experiencia acumulada y el factor subjetivo juegan un papel preponderante.

Otra diferencia fundamental radica en el tamaño del bloque, los métodos tradicionales emplean bloques de grandes dimensiones definidos sobre la base de la aplicación de la geometría descriptiva y proyectiva, y de aspectos geológicos, mientras que los métodos computarizados permiten realizar la estimación en bloques locales, sustentándose en la distribución espacial de las leyes, aunque hay que destacar que el tamaño del bloque lo

determina la persona que realiza la estimación, de una manera que, aunque menos subjetiva, se apoya principalmente de la variabilidad de las leyes, continuidad geológica de las mineralizaciones, tamaño de las muestras y espaciamiento entre ellas, capacidades de los equipos mineros y altura de diseño de los taludes de explotación, por lo que la experiencia acumulada del estimador juega un papel importante.

Para propósitos de estimación, existen variados criterios que pueden proporcionar una medida o un estimador de una característica bajo estudio. Lo que realmente hace la diferencia entre un criterio y otro, es la exactitud de estas estimaciones y la precisión que las afecta. Por exactitud, entendemos la aproximación que existe entre el valor de nuestra estimación y el valor real desconocido que esperamos medir. Por precisión, entendemos las fluctuaciones de nuestras estimaciones con respecto a su valor esperado. Así un estimador puede ser exacto y estar afectado por una gran imprecisión. Viceversa, un estimador puede ser inexacto y estar afecto a una gran precisión.

Exactitud y Precisión. *En teoría del muestreo de minerales se utilizan las nociones de exactitud y precisión. En términos estadísticos estos conceptos corresponden respectivamente a la media, la cual debe ser insesgada (exactitud) y a la varianza del error, la cual debe ser pequeña (precisión).*

Exactitud \Leftrightarrow Media

Precisión \Leftrightarrow Varianza

“La media debe ser insesgada (sin desviación sistemática) y la varianza debe ser pequeña”.

En términos de estimación, el Krigeaje consiste en encontrar el mejor estimador lineal de una variable en una región del espacio, considerando la información disponible, es decir el valor de muestras ubicadas al interior o al exterior de la región que se desea estimar. El Krigeaje consiste en efectuar una ponderación, es decir asignar un peso al valor asociado a cada muestra. Estos pesos serán calculados de manera de hacer mínima la varianza de estimación, considerando las características geométricas de los elementos envueltos (forma y dimensiones del bloque o Unidad de Selección Minera [USM]), e implantación relativa

de las muestras con respecto al bloque y la continuidad espacial de la variable bajo estudio.

El interés del Krigeaje aparece en su definición misma, al minimizar la varianza de estimación, estamos aprovechando al máximo la información disponible, en otras palabras, obteniendo la estimación más precisa del bloque en estudio.

SITUACIÓN PROBLÉMICA.-

En la actualidad para la determinación del tamaño racional de la USM, no se tiene en cuenta la influencia del tamaño de las mismas, en la exactitud y precisión de las estimaciones.

PROBLEMA CIENTÍFICO.-

Inexistencia de criterios que demuestren la influencia del tamaño de la USM, en la exactitud y precisión de la estimación de recursos minerales en yacimientos de materia prima para cemento.

OBJETO.-

Tamaño de la USM, en yacimientos de materia prima para cemento.

HIPÓTESIS GENERAL.-

El uso de la Simulación Geoestadística proporcionará vías para demostrar la influencia del tamaño de la USM, en la exactitud y precisión de la estimación en yacimientos de materia prima para la producción de cemento.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.-

- ♦ *La determinación de los modelos que describen adecuadamente las características de variabilidad y correlación espacial del contenido de CaO, garantizará una caracterización de los recursos minerales en yacimientos para cemento con mayor precisión.*

- ◆ *El uso de la simulación geoestadística, permitirá proponer posibles valores reales y poder realizar comparaciones de variables y varianzas de estimación.*
- ◆ *La comparación de los resultados de la estimación por Krigeaje con los datos obtenidos por simulación, permitirá corroborar los problemas relacionados con la precisión y la exactitud de la estimación de recursos in situ, cuando hacemos cambio de tamaño de la USM, en cualquier tipo de yacimiento.*

OBJETIVO GENERAL.-

Comprobar la influencia del tamaño de la USM, en la exactitud y precisión de la estimación en yacimientos de materia prima para la producción de cemento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-

- ◆ *Obtener los modelos que describen las características de variabilidad y correlación espacial de los parámetros geólogo - industriales empleados en la estimación de recursos, que garantice la estimación y la caracterización de estos recursos con mayor precisión tanto a escala global como local.*
- ◆ *Comparar diferentes unidades de selección minera utilizando la estimación y la simulación geoestadística.*
- ◆ *Elaborar una metodología a partir de los resultados prácticos, para corroborar la influencia del tamaño de la USM, en la precisión y exactitud de la estimación de recursos in situ.*

TAREAS.-

Para el cumplimiento de los objetivos fue necesario realizar las siguientes actividades:

- 1. Revisión bibliográfica de información que relaciona la USM con la precisión y exactitud de la estimación.*
- 2. Recopilación de la información geológica, elaboración, organización y verificación de la base de datos de los parámetros geólogo – industriales del yacimiento Mariel, a*

partir de la información en formato digital, obtenida durante la elaboración del proyecto minero para la Empresa Cementos Curazao S.A.

- 3. Identificar sistemas automatizados que permitan la aplicación de la Simulación Geoestadística, y otros sistemas que permitan el diseño los límites físicos del modelo geológico, volumétrico y geométrico o de bloques para realizar los cálculos fundamentales relacionados con el análisis de la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación.*
- 4. Definir los elementos fundamentales para la elaboración de una metodología para la determinación de la influencia de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de recursos minerales sólidos.*
- 5. Procesar la información del yacimiento, a través del empleo de la metodología de comparación elaborada.*
- 6. Visualizar los resultados obtenidos en el procesamiento.*

MÉTODOS Y TÉCNICAS.-

Se realizarán estimaciones con diferentes tamaños de USM con iteraciones de 5 metros en la horizontal y una altura de USM constante en la vertical.

Posteriormente, se generará un modelo simulado que respete la variabilidad espacial de los parámetros geólogo – industriales del yacimiento “Mariel”, con una red de 1 x 1 x 1 metro, que constituirá para nosotros la realidad y será nuestro patrón de comparación.

Se calcularán los promedios móviles para cada tamaño de USM utilizado en el experimento y se actualizarán los modelos de bloques construidos con estos resultados.

Con los resultados obtenidos se realizarán comparaciones entre los resultados obtenidos aplicando Krigeaje y los obtenidos por simulación, para cada modelo de bloque. Además se calcularán los errores en la determinación de la variable por simulación y por Krigeaje y se compararán, tomando como real el valor dado por la simulación.

Los métodos de investigación utilizados para el cumplimiento de las tareas son: la revisión bibliográfica, la estimación por Krigeaje y la simulación geoestadística. Los métodos geoestadísticos empleados incluyen: el análisis exploratorio de datos, análisis estructural, simulación condicional, estimación por Krigeaje Ordinario de bloque. Se utilizaron en el procesamiento los programas informáticos: Statistica 6.0 for Windows, GsLib90 (versión 2.905), Geostat v. 1.20, S-GeMS v. 1.4, GEMCOM System v. 4.11, Microsoft Office 2003, y CELDA 3D v. 1.0, software desarrollado por un colega del autor, para el cálculo de promedios mediante ventanas móviles.

RESULTADOS ESPERADOS.-

Esperamos demostrar que el tamaño de la USM influye en la precisión y exactitud de la estimación y dejar pautas para una investigación más completa sobre la metodología para la determinación del tamaño óptimo de la USM.

La necesidad actual de la investigación está dada por el insuficiente conocimiento de hasta donde influye el tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos in situ del yacimiento Mariel y de esta manera, obtener un mejor rendimiento durante la explotación de esta materia prima, que contribuya a la explotación adecuada de estos recursos de la economía nacional.

Esta investigación contribuye al programa estratégico de la expansión de la producción de cemento. Involucra a la Empresa Cementos Curacao S.A., especialistas de PROYEST, (División de Ingeniería del Grupo GEOMINSAL), al Instituto de Geología y Paleontología, la ONRM y a la Universidad de Pinar del Río.

La novedad del tema es la definición e introducción de una metodología para la determinación de la influencia de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de recursos minerales in situ en yacimientos cubanos de materia prima para cemento.

El trabajo está compuesto de: resumen, introducción, cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

En el Capítulo I se hace una referencia a los trabajos fundamentales de geología realizados en la zona de estudio y de la aplicación de métodos geoestadísticos relacionados con el

cambio de soporte y la elección de un tamaño óptimo de la Unidad de Selección Minera.

El Capítulo II contiene una breve caracterización geológica actualizada del área de estudio.

En el Capítulo III se describe la metodología propuesta por el autor para la demostración de la influencia del tamaño de la unidad de selección minera en la precisión y exactitud de la estimación.

En el Capítulo IV se describe la aplicación de la metodología propuesta, donde se confeccionan 9 modelos geométricos del área seleccionada del yacimiento y se realizan las estimaciones y la simulación secuencial gaussiana a un sector del área de estudio a partir del modelo de variabilidad espacial de los datos primarios, para proponer posibles datos reales, calculando los promedios mediante ventanas móviles para cada modelo creado y se realiza la comparación entre estos y los estimados por Krigeaje. Por último se comparan los resultados y se llega a conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I.- REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.-

I.1.- INTRODUCCIÓN.-

Al proceder a una estimación de bloques por Krigeaje, es indispensable organizar la información de modo de establecer un ordenamiento y un inventario de muestras a utilizar, así como de los bloques a estimar.

La manera de proceder a esta actividad es mediante la creación de un modelo geológico y geométrico del depósito.

El problema que surge naturalmente es que el tamaño de bloque óptimo, requerido para cada una de las dos tareas (distribución de leyes o cualquier otra propiedad y modelación de formas, así como la extracción) es diferente, entonces no preguntamos: ¿Hasta donde influye el tamaño del bloque o USM en la exactitud y precisión de la estimación?.

Algunos autores (Segovia, 2001) proponen utilizar dos modelos, uno para estimar la distribución de leyes del depósito y otro para obtener el volumen óptimo de los recursos; el primer modelo no tiene en cuenta la utilización de sub – bloques o el porcentaje de mena dentro del bloque, lo cual permite una estimación mas objetiva de los parámetros o variables (ej. Leyes, pesos volumétricos, etc.), aún así, el autor de este trabajo opina que este modelo, no cumple con los objetivos globales de la estimación, aunque otros autores se basan en que durante el proceso de extracción de las reservas no se tienen en cuenta los sub – bloques debido a las exigencias impuestas por el equipamiento minero utilizado y la tecnología de extracción.

El segundo modelo si bien ofrece una estimación óptima de los volúmenes de recursos y reservas por un mejor acomodo del modelo geométrico a los límites físicos del modelo geológico, tiene la desventaja de proporcionar modelos muy grandes y la obtención de valores repetitivos de las propiedades estimadas en los sub – bloques contiguos y/o cercanos debido, como es lógico, a la distribución espacial de los datos utilizados en la estimación de los mismos.

I.2.- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS CLÁSICOS DE ESTIMACIÓN.-

Antes de existir las computadoras los estimadores utilizaban métodos trigonométricos y geométricos descriptivos y proyectivos o también llamados “Métodos Clásicos”, para la estimación de los recursos de un depósito mineral, estos métodos son, según Maksimov, et al, (1973):

1.- Método de la media aritmética.

Durante la estimación de los recursos con este método, los cuerpos minerales útiles limitados por superficies complejas son igualados, en los límites del contorno interior, a una lámina de altura constante e igual a la potencia media.

El volumen del cuerpo de mineral útil, dentro de los límites del contorno interior es determinado mediante la formula: $V = S \times m_m$, donde V es el volumen del cuerpo; S es el área del cuerpo; m_m es la potencia media.

El volumen del mineral útil existente en la franja ubicada entre los contornos y se calcula como producto del área por la mitad de la potencia media del cuerpo de mineral útil.

Los recursos de materia prima se determinan con la formula: $Q = V\gamma$, donde Q es el peso del mineral útil; γ es el peso volumétrico.

Los recursos de componente útil se hallan, utilizando la fórmula: $P = \frac{QC}{100}$, donde P es el peso del componente útil, C es el contenido de componente útil en la mena.

Este método sólo puede utilizarse en caso de una distribución uniforme de las labores y ante potencias y contenidos de componente útil estables; no pudiendo en cambio ser utilizado para efectuar la estimación de recursos de distintos tipos de mineral útil dentro de un mismo depósito.

2.- Método de los bloques geológicos.

Al utilizar este método de estimación, el área del cuerpo mineral se divide en bloques de acuerdo con el tipo de mineral útil, el grado de reconocimiento del mismo, las condiciones técnico – mineras e hidrogeológicas, el orden a seguir durante la explotación, etc. La estimación de los recursos de cada bloque se efectúa por el método de la media aritmética. El cuerpo mineral se transforma en una serie de figuras cerradas, cuya altura se iguala a la potencia media de cada bloque.

3.- Método de los bloques de explotación.

Este método se utiliza para la estimación de recursos de bloques aislados en los que se ha dividido, por labores mineras, al cuerpo de mineral útil. Los bloques son partes del cuerpo, contorneadas y donde se ha efectuado el demuestre por los cuatro costados. El cuerpo de mineral útil se transforma, por medio de galerías y contrapozos, en una serie de paralelepípedos cerrados de iguales dimensiones, la altura de los cuales se iguala a la potencia media del bloque. Los recursos en cada bloque se estiman por el método de la media aritmética. La estimación de los recursos se realiza en el plano o en el perfil longitudinal, con proyección sobre el mismo del sistema de labores horizontales y verticales.

Cuando el plano de proyección del cuerpo mineral y de las labores no es paralelo al yacimiento, el valor del área se determina con la formula $S = \frac{S'}{\cos \alpha}$, donde S es el área real del bloque; S' es la proyección del área del bloque; α es el ángulo formado por el plano medio del yacimiento y el plano de proyección de éste.

En los casos en que el demuestre por obras mineras y la medición de las potencias se realicen por la normal al plano de proyección, no corresponde introducir la corrección de ángulo.

4.- Método de los cortes.

La estimación de los recursos se lleva a cabo por suma sucesiva de los pequeños trozos trapezoidales del cuerpo mineral, ubicados entre las labores en una línea de prospección, hasta la estimación total de los recursos en el área ubicada entre líneas.

La estimación de los recursos con el método que nos ocupa se efectúa por las siguientes etapas:

a.- Se determinan los recursos en los sectores ubicados entre dos labores de la línea de prospección (para sectores de 1 metro de ancho) por la formula: $V_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} a$, donde V_1

es el volumen del sector ubicado entre dos labores; a es la distancia entre dos labores por la línea de prospección; m_1 y m_2 son las potencias del cuerpo mineral por las labores; $Q_1 = V_1 \times \gamma$, $P_1 = Q_1 \times C_1$, donde Q_1 son los recursos de mineral útil; γ es el peso volumétrico; C_1 es el contenido medio del componente útil; P_1 son los recursos del componente útil.

b.- Se suman los recursos de estos trapezoides por la línea de prospección dada;

c.- Se determinan mediante fórmulas los recursos entre cortes;

d.- Se determinan los recursos del yacimiento por medio de la suma de los recursos de los distintos sectores, $Q = \frac{Q_I + Q_{II}}{2} l$ ó $Q = \frac{Q_I + Q_{II} + \sqrt{Q_I Q_{II}}}{3} l$, donde Q son los recursos de

mineral útil en los sectores ubicados entre los cortes Q_I , Q_{II} son los recursos de mineral útil en las franjas por las líneas de prospección I y II; l es la distancia entre las líneas; ó $Q = Q_1 K$, donde K es la anchura de influencia de la línea de prospección, igual a la semisuma de las distancias hasta las líneas vecinas.

La estimación de los recursos, por el método de los cortes paralelos, puede ser realizada en forma más sencilla; conociendo el área de las secciones se pueden estimar los recursos entre las mismas multiplicando la semisuma de las áreas por la distancia entre ellos o multiplicando la magnitud del área por la anchura de influencia.

Para los bloques extremos, apoyados en una sola sección, el volumen se determina por la fórmula de la cuña: $V = \frac{S \times l}{2}$ ó del cono $V = \frac{S \times l}{3}$, donde S es el área de la sección del extremo; l es la distancia de la sección al punto de acunamiento.

A fin de estimar los recursos de mineral y de componente útil, se hallan los valores medios del peso volumétrico y del contenido, en principio por secciones aisladas y luego para todo el bloque.

5.- Método de los perfiles o secciones no paralelas.

En este caso se utilizan las fórmulas perfeccionadas por G. S. Zolotariov:

$$a.- \text{Ángulo entre los cortes menor de } 10^\circ; Q = \frac{(Q_I + Q_{II})(H_I + H_{II})}{4};$$

$$b.- \text{Ángulo entre cortes mayor de } 10^\circ; Q = \frac{\alpha}{\cos \alpha} \times \frac{(Q_I + Q_{II})(H_I + H_{II})}{4},$$

donde, Q son los recursos entre las líneas de prospección I y II; Q_I, Q_{II} son los recursos en las franjas por las líneas de prospección I y II; H_I, H_{II} son las perpendiculares trazadas desde los centros de gravedad de las secciones I y II hasta la línea de prospección opuesta; α es el ángulo entre las líneas de prospección (en radianes).

Puede también utilizarse el método de A. P. Prokofiev, que se reduce a multiplicar la potencia media del cuerpo de mineral útil por corte, por la superficie de este cuerpo adyacente al corte: $V' = m' S'$, donde V' es el volumen del cuerpo de mineral útil adyacente a uno de los cortes; m' es la potencia media del cuerpo mineral útil por corte; S' es la superficie del cuerpo de mineral útil adyacente a la sección.

6.- Método de los polígonos.

Este método se reduce a la separación de la zona ubicada alrededor de cada punto en el que la labor intercepta al cuerpo de mineral útil, estando todos los puntos de dicha zona más cercanos a esa labor que a cualquier otra. Para ello todo el plan de estimación se divide en polígonos, en tanto que el cuerpo mineral se transforma en un grupo de prismas

poliédricos cerrados, cuyas bases son los polígonos ya citados, siendo su altura igual a la potencia del cuerpo por la labor que se encuentra en el centro del polígono.

Para la construcción de los polígonos se emplea el siguiente teorema geométrico: la perpendicular trazada desde el centro de un segmento de línea recta, es el lugar geométrico de los puntos equidistantes de los extremos del segmento.

Para la utilización de este principio se realizan las siguientes construcciones: se procede a unir, en el plano de estimación, cada una de las labores vecinas mediante rectas auxiliares y desde el centro de estas líneas se trazan las perpendiculares. Las perpendiculares, al interceptarse, forman un polígono alrededor de cada labor.

Durante la estimación de los recursos con este método, entre los contornos interior y exterior se traza la línea media y se trazan las perpendiculares al centro de los lados que unen las labores ubicadas en el contorno interior. Las perpendiculares se trazan hasta la intercepción con la línea media en la zona existente entre ambos contornos.

La estimación de recursos de cada bloque (prisma) es efectuada según las fórmulas $Q = S \times m \times \gamma$, $P = S \times m \times \gamma \times C$, donde S es el área del polígono; m es la potencia de la capa útil por el pozo de perforación; α es el peso volumétrico; C es el contenido de componente útil por labor. Actualmente este método es poco empleado.

También hace algún tiempo solían utilizarse, además de los ya mencionados, los métodos de los triángulos, isolíneas e isohipsas, que después dejaron de ser utilizados.

A partir de la descripción realizada, el autor de este trabajo considera, que si bien estos métodos de estimación resolvieron, en su momento, el problema de conocer la cantidad y calidad de una determinada materia prima o mena, imposibilitaban un conocimiento y explotación selectiva de los recursos, al no poder discretizar los mismos y caracterizarlos por unidades de selección minera que desde el punto de vista minero – tecnológico fuera posible su extracción, con un control eficiente de la dilución y el empobrecimiento, es por esta razón que se hizo imprescindible pasar a métodos geomatemáticos superiores que dieran al traste con esto.

I.3.- ACTUALIDAD DE LA METODOLOGÍA AUTOMATIZADA DE ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES.-

Como en cada sector industrial en los últimos 30 años, los requisitos de esta actividad, han sufrido cambios. Aunque las instituciones mineras, todavía practican el trabajo manual, la habilidad del ingeniero estimador moderno, con una computadora, se ha vuelto una preocupación primaria.

Esto no quiere decir que la minería se ha vuelto una ocupación estéril de oficina; el trabajo sucio de la perforación de exploración todavía es el fundamento de la minería, aún cuando esté basada en la información de levantamientos geomagnéticos aéreos, o los análisis espectrales electromagnéticos, de imágenes tomadas por los satélites.

*A partir del surgimiento de los primeros ordenadores personales comenzaron a crearse diferentes sistemas para realizar estimaciones de parámetros geológicos y mineros de forma automatizada, y a partir de los límites físicos del modelo geológico surgió el concepto de modelo geométrico tridimensional el mismo consiste en: **Dividir un depósito que ha sido delineado por pozos de perforación ampliamente espaciados, en unidades de selección mineras o bloques bastante pequeños para dar una representación adecuada de realidad, para los propósitos mineros (Tulcanaza, 2000).***

Dependiendo del tipo de depósito con el que usted está trabajando y el método de interpolación usado, el modelo intentará reflejar la verdadera naturaleza del cuerpo mineral para reforzar la exactitud del volumen y las estimaciones de costo/beneficio.

*Con un sistema automatizado, usted puede construir y procesar, al menos, dos tipos diferentes de modelos. Ellos son: **LAMINAR** ó de **REJILLA** y de **BLOQUE**.*

El modelo laminar se usa en carbón, bauxita y minerales pesados, donde los cuerpos de la mena son semi - continuos, ondulados y pueden expresarse como capas enrejilladas. Ellos son modelados creando superficies para cada contacto o junta en el colgante y yacente del cuerpo mineral. Los ficheros (de las superficies), contienen la matriz bidimensional de cada contacto y pueden ser generados y/o editados separadamente.

Por otro lado, el modelo de bloque no es más que una definición de rejilla tridimensional regular. Los bloques (o celdas) tienen las mismas dimensiones laterales, con una elevación constante para cada banco. Las celdas guardan la información definida en sus centros

Normalmente se usan modelos de bloque donde la elevación no es el requerimiento importante sino donde predomina la diferenciación de los datos de los ensayos, por ejemplo, oro, mena férrica y metales básicos.

El modelo geométrico del depósito permite organizar, presentar y resumir la información del yacimiento de acuerdo a volúmenes específicos. Estos pueden variar de tamaño según criterios de selectividad, condiciones operativas de la explotación e información disponible (Tulcanaza, 2000).

*Una vez definido el tipo de modelo geométrico a ser utilizado se procede a la estimación de las diferentes variables en estudio para cada Celda o Unidad de Selección Minera (USM), utilizando para esto interpoladores como son el **Krigeaje**, **Inverso de la Distancia**, etc.*

Buscando mejorar la precisión y exactitud de dichas estimaciones y evitar un problema que tienen todos los métodos descritos anteriormente, que es el sobre estimar la calidad en los bloques que tienen altos contenidos y subestimar la calidad en bloques que contienen muestras de bajo grado, se necesita una mejora en la estimación del bloque.

La calidad estimada del bloque necesita tener en cuenta otras muestras cercanas al bloque y no sólo el valor dentro del bloque.

Está claro que deben tener más influencia en la estimación las muestras más cercanas al bloque que aquéllas más lejanas de él. Esto llevó a la idea de darle un peso a cada muestra por el inverso de la distancia al bloque a estimarse (I.D.W. – Inverse Distance Weighting). Estudios de Daniel G. Krige en 1951 mostraron que, los resultados más exactos al estimar la calidad de un bloque, fueron obtenidos, usando el método del inverso de la distancia al cuadrado (Journel y Huijbregts, 1978).

Aunque este método mejoró la estimación de la calidad, había un par de desventajas usándolo. Una era que, la opción del peso no se relacionó a la geología real del depósito.

No había también exactitud en la estimación obtenida de los valores y fue necesaria una medida del error de estimación.

Krige experimentó con los promedios de los pesos para estimar las reservas de oro. Él creyó que había una mejor manera de estimar la calidad del bloque y el error asociado con la estimación. El Dr. George Matheron (1962) siguió entonces a en esta idea y nos dio lo que es conocido hoy como Krigeaje ó Kriging.

Existen diferentes métodos de interpolación como son:

a.- Triangulación con interpolación lineal.

b.- Inverso de la distancia al cuadrado.

c.- Vecino más cercano.

d.- Regresión polinomial.

e.- Curvatura mínima.

f.- Krigeaje ó Kriging.

El Krigeaje al minimizar la varianza de estimación, aprovecha al máximo la información disponible, en otras palabras, obtiene la estimación más precisa del bloque en estudio. Pero el interés práctico más importante es que, a nivel global, permite evitar un error sistemático, es decir evita un sesgo de sobreestimación o subestimación (David, 1977; Tulcanaza, 2000).

En este punto es donde los métodos automatizados han logrado aventajar de forma aplastante a los métodos clásicos; la posibilidad de discretizar los recursos en pequeños bloques, estimar para cada uno el valor de las variables en estudio, así como su volumen, masa, y otras características, además de tener la posibilidad de optimizar el diseño de la mina, ya sea a cielo abierto ó de forma subterránea, ha permitido una extracción verdaderamente selectiva de los recursos, mejorando los parámetros de rendimiento y recobrado de la mena en explotación, así como una mejor operación minera en cuanto a la

facilidad de mezclas, aprovechamiento de menas pobres, creación de almacenes (stock piles) y fácil diferenciación y manejo de bloques estériles.

*La optimización del diseño minero ha transitado por varios métodos así tenemos que en 1965 M. J. Pana de la Kennecot propuso el **diseño mediante un cono flotante**, que ha continuado con mucha aceptación en la industria minera al paso del tiempo. El algoritmo es muy simple y aunque no proporciona la envolvente óptima, ejecuta un trabajo más que adecuado. Se trata de considerar en cada nivel, en cada fila y columna tras columna, un bloque unitario de beneficio económico positivo como base de un cono invertido. Las paredes del cono deben responder a las pendientes exigidas por la geotécnica para cada sector del depósito. En la medida que el balance final de todos los bloques, en el interior de este cono truncado, resulta positivo, el cono entero se extrae. Se modifica la topografía de la cantera y se continua considerando el próximo bloque unitario de beneficio económico positivo y así sucesivamente. La debilidad más criticada de este procedimiento es su incapacidad para considerar conos adyacentes que puedan soportarse económicamente. Por supuesto que existen maneras de solucionar este problema mediante la consideración de varias iteraciones.*

Lerch y H Grossman de la IBM fueron los primeros en establecer una metodología optimizante para el diseño de canteras. Sus trabajos se basaron en la aplicación de técnicas de programación dinámica y se concentro en el diseño de una cantera a dos dimensiones. La optimización lograda por este algoritmo en la configuración de una cantera a dos dimensiones puede ser demostrada matemáticamente. La extrapolación del algoritmo optimizante a un diseño a tres dimensiones fue principalmente una labor de T. Jonson y Sharp (1971).

Sin embargo, en este caso, la acumulación de secciones optimizadas a dos dimensiones no conduce a una optimización inmediata del conjunto a tres dimensiones. El algoritmo es muy rápido y una serie consecutiva de canteras puede ser analizada en poco tiempo para proceder a una comparación posterior.

***El diseño mediante la teoría de grafos** permitió a los ingenieros Lerch y Grossman (1965) establecer una metodología optimizante para un estado final de cantera tridimensional.*

Básicamente se trata de unir los bloques entre si mediante ramas. Existen ramas fuertes (p. ej., balance económico positivo) y ramas débiles (balance económico negativo). Para extraer una rama fuerte es necesario extraer aquellas ramas que condicionan su extracción. La configuración de bloques establecida para el análisis de la extracción debe considerar una expansión cónica, que abarque normalmente tres niveles, basada en condiciones geotécnicas (Tulcanaza, 2000).

En resumen creando una “mina virtual” dentro de una computadora puede verse en unos pocos minutos, el ciclo completo de vida de una mina. Pueden verse muchos escenarios. Un ingeniero puede cambiar la ley de corte en $\pm 0.01\%$ ó aumentar el costo de operación del equipo en 2%, y ver la factibilidad económica de explotar un depósito, todo esto antes de que se construya un solo camino de acceso en el sitio.

Las computadoras más rápidas consiguen, la mejor “mina virtual” que se puede dirigir, llevando a esta, los funcionamientos mineros más eficaces y eficientes.

Esta tecnología no sólo es aplicable a los sitios mineros, también es muy eficaz para trazar un plan de acción más detallado, para el mejor funcionamiento de la producción establecida.

Con este trabajo pretendemos coadyuvar a la Informatización de la Sociedad, que es el proceso de utilización ordenada y masiva de las tecnologías de la información y las comunicaciones en la formación del conocimiento necesario para la vida cotidiana de los ciudadanos y las instituciones, en todas las esferas de la sociedad y en todos los procesos, para lograr cada vez más eficacia y eficiencia que de como resultado el incremento constante de la calidad de vida de los ciudadanos y la generación de riquezas que la haga sostenible.

I.4.- REPERCUSIÓN DEL TAMAÑO DE LA UNIDAD DE SELECCIÓN MINERA (USM) EN LA EXACTITUD Y LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS.-

La obvia necesidad de reconciliación entre los recursos estimados (in situ) y las reservas minables o recuperables, es básicamente económica, toda desviación entre leyes o contenidos produce una pérdida económica, como lo indican las siguientes relaciones:

<i>Bloque de mineral rico</i>	<i>Subestimación</i>	<i>Pérdida debido a postergar la extracción de bloque de mineral más rico.</i>
	<i>Sobreestimación</i>	<i>Pérdida debido a anticipar la extracción de mineral menos rico de diferentes características y diferentes relaciones costo/ingreso.</i>
<i>Bloque de mineral pobre</i>	<i>Subestimación</i>	<i>Pérdida debido a un posible envío a estéril.</i>
	<i>Sobreestimación</i>	<i>Pérdida debido a anticipar la extracción de mineral más pobre.</i>

*Todas las pérdidas descritas anteriormente pueden ser calculadas y evaluadas en términos económicos. Entre los factores que influyen la magnitud de estas pérdidas se encuentran el grado de información (en la exploración, en la estimación, en el nivel de selectividad, en le frente de explotación) y **en el grado de selectividad minera (tamaño del bloque [USM] y ley de corte).***

*La estimación de los recursos de un deposito se realiza, normalmente, en base a algún criterio convencional no geoestadístico (polígonos, bloques geológicos, perfiles, etc.) o por Krigeaje. Cualquiera de estos criterios proporciona una **estimación a largo plazo** que, aunque produce una estimación insesgada de estimadores, sumergen la verdadera variabilidad in situ produciendo así un alisamiento artificial de la realidad con desviaciones positivas y negativas. Aparte de considerar criterios geoestadísticos que tiendan a disminuir este efecto de alisamiento como son: Discriminación poblacional, indicadores, simulación u otro, la **estimación a corto plazo** se realiza a partir de los datos obtenidos antes de las operaciones de arranque del mineral a través de los pozos de voladura o del muestreo de buzones en la extracción subterránea.*

*La clave del éxito de la estimación a corto plazo está en determinar, primero: **el tamaño ideal del bloque de mineral** (unidad básica de extracción [UBE] o unidad de selección minera [USM]) que mejor responde a la **distribución ley – tonelaje** más apropiada para el negocio minero, y segundo: la configuración de pozos de voladura (distribución espacial, malla y extensión comprometida en la estimación de un bloque) que se aplicará (por ej., mediante Kriging) a la estimación de los bloques reales del depósito (Tulcanaza, 2000).*

Todo lo anterior se hace obvio y es aplicable en toda su profundidad cuando estamos en presencia de un depósito de mineral metálico, pero cuando estamos frente a un yacimiento de roca para la construcción o de materia prima para cemento, rocas ornamentales, o algún mineral industrial la relación ley – tonelaje no es aplicable y entonces solo nos queda buscar relaciones que maximicen la calidad de la materia prima no metálica con el tonelaje ó potenciar al máximo la selectividad para permitirnos hacer mezclas optimas, como es el caso de estudio que nos ocupa y que esta relacionado con el deposito de materia prima para la fabricación de cemento “Mariel”.

En general una mina de caliza requiere, para una adecuada dosificación de su mineral, disponibilidad de hierro y arcilla. Así, un complejo cementero cuenta normalmente con recursos de hierro y arcilla en las cercanías de sus minas de caliza. Pueden existir dos situaciones: Una en que el complejo cementero tiene un solo tipo de minas de caliza, hierro y arcilla. En este caso, los costos por tonelada de un material dosificado en forma homogénea son realmente estables y la optimización se traduce básicamente en identificar el máximo tonelaje disponible con especificaciones químicas seleccionadas. La otra situación puede envolver complejos que tienen depósitos de caliza, hierro y arcilla de diferente calidad con costos de extracción diferentes. En estos casos, los algoritmos computacionales incorporan técnicas de programación lineal a fin de obtener las mezclas técnico – económicas mas convenientes (Tulcanaza, 2000).

*En sentido general hemos encontrado muy poca literatura donde se aborde el tema de la influencia del tamaño de la **Unidad de Selección Minera** en la **precisión** y **exactitud** de la estimación in situ de recursos minerales y de los recursos minerales no metálicos en particular no hemos podido encontrar algo.*

Tulcanaza (2000), explica un ejemplo para dimensionar la Unidad Básica de Extracción (UBE) o Unidad de Selección Minera (USM).

Este método se basa en relaciones geoestadísticas que asocian un tamaño seleccionado de bloque, con la distribución de leyes de mineral correspondiente a esos bloques. Estas relaciones, generadas básicamente a partir de la llamada relación de varianzas de dispersión y complementadas con expresiones específicas al tipo de distribución de leyes obtenido, permiten evaluar, para diferentes leyes de corte seleccionada, una serie de parámetros técnico – económicos característicos de cada tamaño de bloque unitario considerado. El ejecutor selecciona los escenarios a probar basándose en los aspectos, arriba mencionados, para determinar el tamaño óptimo de la USM, lo que trae por consiguiente un trabajo arduo y extenso de cálculos y estimaciones complejas que requieren tiempo.

Como conclusión, su método ofrece resultados que indican que tamaño de bloque favorece la obtención de resultados ventajosos o no, en el proceso de explotación de las reservas y la maximización de las ganancias, pero no habla de hasta donde, una correcta selección del tamaño de la USM favorece o no la exactitud y precisión de la estimación de los recursos minerales in situ, en el deposito utilizado como ejemplo.

Otro tema tratado en la literatura y relacionado con el tamaño de la USM y la precisión y exactitud de la estimación, es el cambio de soporte.

El cambio de soporte, por medio del cual muestras tomadas sobre un soporte (volumen) se usan para estimar bloques con un soporte, normalmente más grande, todavía es un problema crítico, particularmente en la industria minera, (Glacken, 2001). Si ignoramos el cambio de soporte, la predicción del recobrado real de reservas resulta típicamente pobre, con la sobrestimación de bloques de altas calidades y subestimación de bloques bajas calidades por calidades puntuales.

Este problema fue tempranamente identificado y recibió mucha atención de la comunidad geoestadística en los años setenta y comienzos de los años ochenta.

Fueron creados varios algoritmos para cambio de soporte; éstos incluyen la corrección ane, durabilidad de métodos de distribución, la corrección lognormal indirecta, y el modelo Gaussiano discreto. Muchos de estos métodos tienen asunciones estrictas y limitaciones, como la adopción de la misma forma de la distribución para los puntos y bloques, reducción excesiva de asimetría, la no-preservación de modos secundarios, o falta de robustez. Además, muchos de los acercamientos tempranos eran globales, en estos no había ninguna consideración de los datos locales específicos para cada bloque, y sólo es devuelto un solo valor del bloque estimado - un valor sujeto a suavización y sesgo condicional. En la geoestadística no-lineal, el cambio local de soporte se ha logrado usando el kriging disyuntivo con el modelo Gaussiano discreto o el isofactorial. Verly (1984) examinó el cambio de soporte bajo el modelo multiGaussiano (Glacken, 2001).

Si una distribución de valores que modelan la incertidumbre específica para cada bloque estuviera disponible, sería posible especificar una estimación basada en cualquier criterio de optimización apropiado para la situación particular, no sólo los criterios específicos del error de los mínimos cuadrados característico de Krigeaje. Una manera de lograr esto es mediante la simulación condicional (Deutsch y Journel, 1998).

El cambio de soporte por simulación condicional

La simulación estocástica tiene la propiedad de devolver una distribución de probabilidad de valores (una cdf ó ccdf condicionales) modelando la incertidumbre en lugares no muestreados. Además, esta distribución puede hacerse condicional a los datos. Generando sobre el depósito entero o área de interés, cualquier realización única aproxima ambos el histograma y el variograma, a la estadística de los valores de entrada.

El uso de la simulación condicional para el cambio de soporte fue propuesto por Deutsch y Journel (1992) y por Journel (1993). El principio es simular los valores puntuales en la escala discretizacional de sub-bloques y entonces promediar éstos para obtener un valor del bloque (siempre que los promedios sean linealmente variables).

A partir de muchas realizaciones se puede obtener una ccdf del bloque. Gómez-Hernández (1991) exploró el cambio de soporte (sobre escalamiento) de variables no-lineales promediadas.

Mientras, casi cualquier técnica de la simulación condicional puede adaptarse para este propósito, el formalismo de LU es particularmente apropiado. Este algoritmo confía en la descomposición de una sola matriz de covarianzas que relaciona datos y valores nodales. Desde que las realizaciones adicionales son obtenidas meramente dibujando un vector de números aleatorios normales, el método es rápido, y satisface situaciones que requieren muchas realizaciones de pequeño tamaño con relativamente algún condicionamiento de los datos. El algoritmo se lleva a cabo secuencialmente para cada bloque con su específico condicionamiento de los datos.

Mientras se conserva la covarianza entre valores puntuales, discretizando cualquier bloque, la técnica no reproduce la covarianza entre los bloques independientemente simulados. Esto por lo tanto satisface idealmente el control de ley bajo selección libre, considerando un bloque en un momento determinado (Glacken, 2001)

*Pero el concepto que a nuestro juicio esta más íntimamente ligado al tema que nos ocupa es el de la **Variable Localmente Definida**, que significa que el volumen sobre el cual se estudia o mide el atributo de interés ejerce un rol básico en su caracterización. Este concepto muestra el efecto del soporte en el volumen mineralizado al considerar un contenido mínimo cualquiera (Matheron, 1970 ; Wackernagel, 1995).*

Este concepto demuestra que al variar el tamaño y/o disposición espacial del soporte (USM) varía el contenido mínimo del depósito y las leyes unitarias de cada bloque, pero no se refiere a la precisión y/o exactitud de la estimación de la variable in situ, en cuestión.

Por otro lado Rossi, (2006) plantea ... el USM depende de la selectividad de la mina; para definir el tamaño, tienes que pensar en el equipamiento minero a ser utilizado, la altura del banco, y el ancho mínimo de minado (que no es lo mismo que el ancho de las palas de los cargadores).

El concepto es que es el tamaño mas pequeño que la mina (operando) pueda separar mineral de estéril. Es una definición subjetiva. Además, si quieres complicarla, puedes considerar que en distintas etapas de la operación (o sectores) la USM puede variar según las condiciones del terreno.

El problema básico que tiene es que es una figura idealizada, porque en la realidad las USM nunca son regulares, y varían de tronadura a tronadura (en cielo abierto). En minería subterránea es diferente, porque los sectores minados son siempre del mismo tamaño (según el método de minado), y no hay mucho espacio para la variación y/o flexibilidad...

Hay 3 grupos de métodos básicos: los "tradicionales", que incluye la corrección por afinidad, la indirecta lognormal, y la discreta Gausiana; una "práctica", donde la corrección se hace controlando el proceso de estimación del Krigeaje (Krigeaje restringido a radios de búsquedas y números de muestras limitados), y la simulación condicional, donde pasas de nodos a bloques de cualquier tamaño (incluyendo USM), y por ende la predicción es tomada directamente del modelo (la corrección por cambio de soporte esta implícita en el promediado a bloques).

En mi opinión y experiencia, este tema esta entre los 3 mas grandes que impactan la calidad de las predicciones de recursos: *definición de estacionaridad (unidades de estimación); modelo geológico adecuado (que capture los controles de mineralización y permita una buena definición de las zonas de estacionaridad); y el cambio de soporte (dilución interna)*

El tamaño de la USM es uno de los aspectos que, en mi opinión, mas impacto tienen en la definición de recursos y reservas, y muchas veces es ignorada. Esta muy relacionado con el concepto geoestadístico de volumen – varianza, o dilución interna del bloque ...

Martínez, (2006) opina que ...el tamaño de bloques controla: a) el error de estimación (no es una función lineal) (regularización), b) la distribución de datos estimados (anamorfosis gaussiana en soporte de bloques, corrección afín)y c) además la forma en que se explota puede cambiar todo.

La unidad de selectividad minera la pone el equipamiento minero, esta no debe ser muy pequeña, pues la Desv. Std. de Krigeaje es inversamente proporcional el volumen v de la USM ...

En nuestro criterio a pesar de la importancia de este tema el mismo es muy poco abordado por la comunidad de estudiosos del tema y cuando lo hacen solo se refieren en su gran mayoría, a su influencia en la productividad, la selectividad, la dilución y el recobrado de metal en los casos de depósitos de minerales metálicos.

I.5.- CONCLUSIONES.-

- 1.- La estimación de un atributo, al interior de un dominio espacial, sea este, una longitud, una superficie o un volumen, a partir de datos conocidos muestreados involucra un determinado error o desviación de la realidad.*
- 2.- Se puede determinar el **tamaño de la USM** que mejor responde a la **distribución ley - tonelaje** a partir de métodos de prueba y error, seleccionando una serie de tamaños de USM y a partir de relaciones geoestadísticas que asocian un tamaño seleccionado con la distribución del leyes de mineral correspondiente a esos bloques.*
- 3.- **El cambio de soporte** es un **problema crítico**, particularmente en la industria minera, siendo uno de los temas **menos estudiados** en la comunidad geoestadística a nivel mundial y muchos algoritmos creados para resolver este problema presentan asunciones estrictas y limitaciones.*
- 4.- El uso de la **simulación condicional** para el **cambio de soporte** es una técnica propuesta recientemente y se ha desarrollado fundamentalmente para el control de ley durante la extracción y no conocemos algún trabajo donde se relacione a la determinación de la precisión y exactitud de la estimación de recursos in situ.*
- 5.- El concepto de **Variable Localmente Definida** involucra definitivamente el tamaño de la USM con el contenido mínimo a ser obtenido en la estimación de un recurso mineral in situ, pero tampoco deja claro cual es la significación que tiene ese volumen en la precisión y exactitud de la estimación del mismo.*

CAPÍTULO II.- GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MARIEL.-

II.1.- INTRODUCCIÓN.-

Es necesario explicar, para la mejor comprensión de este capítulo, que este depósito, en la actualidad, se encuentra en explotación y que la descripción de la geología presentada fue tomada del informe de la exploración detallada del mismo. Durante la exploración se realizó un informe preliminar en abril de 1973, un complemento al informe preliminar y la segunda etapa en 1974. Barkác Z. y Hasch J. (1976).

En el yacimiento Mariel se extrae la materia prima para la fabricación de cemento “René Arcay” a partir del 1918, en la actualidad “Cementos Curazao S.A.”. La cantera está situada en la parte norte y oeste del yacimiento. La distancia de la cantera a la planta es de 0.1 hasta 1 Km.

La altura de estos pisos de explotación es actualmente de 10 – 15 m. En la parte oeste donde se extrae el material corrector la altura de la cantera de explotación es de 40 – 50 m. La longitud de la cantera alcanza 1800 m.

II.2.- LOCALIZACIÓN, TOPOGRAFÍA, CLIMA Y CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS – SOCIALES DE LA REGIÓN.-

II.2.1.- LOCALIZACIÓN.-

El yacimiento de calizas Mariel está ubicado en la costa de la bahía de Mariel a 40 Km al oeste de la ciudad de La Habana. Las coordenadas geográficas del yacimiento son 55°30'00" - 54°30'00" de longitud oeste y 21°00'00" - 23°00'00" de latitud norte.

La cantera y terrenos adyacentes se encuentran del mar (Bahía del Mariel) a una distancia de 100 a 1000m por su parte NO y por el SE se encuentra limitada por zonas ganaderas y por las zonas de cultivo de henequén.

El yacimiento está situado en el mapa 1: 50 000, hoja cartográfica No. 35841, 3684 IV.

II.2.2.- TOPOGRAFÍA.-

El relieve del yacimiento coincide con una pendiente ondulada bastante grande que se achata bruscamente en la dirección oriental transformándose en una meseta casi llana, con cotas máximas de 80 – 90 m sobre el nivel del mar.

La parte inferior de la pendiente cerca de la carretera Mariel – Habana tiene cotas mínimas de 5 – 10 m sobre el nivel del mar.

II.2.3.- Clima.-

Toda la zona del yacimiento tiene un clima semicontinental, húmedo de sabanas. El promedio anual de temperatura según los datos de muchos años oscila entre 22 y 26 °C, raras veces se observan las temperaturas de 15 a 18 °C o de 30 a 35 °C. La humedad relativa del aire es bastante elevada oscilando entre 77 y 82 %, el promedio anual de la humedad relativa es de 77 % mínima absoluta, con una máxima absoluta 96 %.

Por el carácter e intensidad de las precipitaciones se observan dos temporadas: una de sequía que comprende desde noviembre hasta abril y otra lluviosa que continúa desde mayo hasta el mes de octubre, siendo el mes de agosto el más lluvioso.

La cantidad de precipitaciones caídas es irregular. Las precipitaciones medias anuales en la zona oscilan entre 946.6 hasta 1231.5 mm. Máximos días de lluvias 22, promedio de días de lluvia anual 88.

La velocidad del viento varía notablemente, alcanzando desde 10 hasta 40 Km/hora.

II.2.4.- Hidrografía.-

El área entre Queibra Hacha y Mariel (Río Mosquito) presenta algunos ríos de importancia, aunque no tienen gran caudal, que auxiliados por una red de arroyuelos y cañadas drenan la zona en la época de lluvias.

El río más cercano que se utiliza para abastecer de agua a la fábrica “René Arcay” es el río Mosquito que está a 1 Km al oeste del yacimiento.

II.2.5.- Características económicas – sociales de la región.-

II.2.5.1.- INDUSTRIA.-

La región del Mariel cuenta con un importante renglón para la economía del país, esta es la termoeléctrica del Mariel que forma parte del sistema eléctrico nacional unificado.

En las cercanías del yacimiento se encuentra una fábrica procesadora de henequén que además produce sogas de esa materia prima.

Igualmente pertenece a la zona el central Orlando Nodarse que dista unos 8Km del pueblo del Mariel.

De gran importancia son las instalaciones portuarias en la bahía del Mariel donde radica la flota camaronera.

Agricultura. Los cultivos principales en el área en el orden de importancia y extensión son: la caña de azúcar, y el henequén, en menor escala frutos menores como la malanga, maíz, aguacate, etc.

Vegetación. Como expresamos anteriormente la zona del yacimiento está muy cultivada y donde no, está la vegetación natural que presenta las siguientes características: La flora está constituida por vegetación leñosa, que se establece cerca de los ríos y preferentemente sobre los terrenos que quedan secos durante el reflujo, la especie que más abunda es el mangle rojo.

II.2.5.2.- CONDICIONES DE TRANSPORTE Y ABASTECIMIENTO DE AGUA.-

Por la región pasa la autopista de primera clase La Habana – Mariel – Pinar del Río. La planta y la cantera están situadas cerca de la autopista. Mariel dispone de un puerto, en el cual pueden anclar buques de gran tonelaje.

Aproximadamente a 15 Km de la zona investigada se construyó una moderna autopista de ocho vías. Por el yacimiento pasan muchos caminos vecinales, los cuales no son posibles utilizar en el tiempo de lluvias.

El abastecimiento de agua potable, en el caso de los pueblos aledaños y de la ciudad de Mariel, se efectúa por medio de acueductos. Las plantas de cemento se abastecen de agua del río Mosquito el cual se encuentra represado.

II.3.- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL YACIMIENTO Y DE SUS ROCAS ENCAJANTES.-

El yacimiento se encuentra en la parte SE del anticlinal Cabañas – Mariel, está formado por rocas sedimentarias de edad Cretácico, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. En el yacimiento predominan los sedimentos del Paleógeno – Neógeno. La potencia de los sedimentos del Cretácico en esta zona es desconocida. Las rocas del Cretácico aparecen principalmente en la parte SO del yacimiento. Su edad se ha determinado por la paleontología. Los sedimentos del Cretácico superior hasta Eoceno medio tienen carácter de “flysh”.

La sedimentación de las rocas presentes en el yacimiento no ocurrió continuamente; el contacto de las rocas de diferentes tipos petrográficos es en su mayoría agudo, también las relaciones de yacencia caracterizadas por la dirección e inclinación de las capas son diferentes. La sedimentación de casi todos los tipos de rocas individuales ocurrió en ciclos, los cuales siempre terminaron con la elevación del fondo marino y en esta pausa del proceso de sedimentación actuaron en la formación de las capas los factores exógenos (denudación de algunos perfiles de las capas o de todas las capas). Naturalmente que los movimientos del fondo marino estaban acompañados por las manifestaciones tectónicas secundarias, es decir, por el plegamiento de las capas y la formación de las fallas, por las cuales se llegaron principalmente a los movimientos verticales de las capas yacentes. Es necesario decir que los ciclos sedimentarios siguientes no siempre están caracterizados por el cambio del tipo de rocas, pero muy a menudo continúa la sedimentación de las rocas, las cuales se diferencian muy poco del ciclo anterior.

Al este se encuentran en la superficie solamente los sedimentos del Neógeno, marga, marga calcárea, caliza coralina cavernosa, caliza margosa, caliza blanda, caliza compacta con las capas de caliza (calcarenita, gravelita) mas blanda de color crema, crema blanco, gris y rojizo. La caliza coralina aflora en el yacimiento con potencias de 0.5 – 30 m.

En el subyacente de la caliza coralina se encuentra solamente la caliza margosa, caliza blanda, caliza compacta y las capas de calizas más blandas, 10 – 20 %. Las capas de estas rocas se cambian rápidamente por las propiedades físico – mecánicas, especialmente la dureza. El contenido de CaCO_3 varía entre 50.5 y 55.23 %. Las diferencias más expresivas se pueden observar solamente en el caso de las calizas coralinas.

La descripción petrográfica de los intervalos de muestreo se hizo en general basándose en los resultados químicos, tomando en consideración el contenido de CaCO_3 del intervalo:

Caliza 90 – 100 %

Caliza margosa 75 – 90 %

Marga calcárea 40 – 75 %

Marga 15 – 40 %

Argilita calcárea 5 – 15 %

Argilita 0 – 5 %

Sin embargo hay que constatar que los intervalos antes mencionados forman un conjunto de rocas, en los cuales están incluidos también las capas o intercalaciones de carácter distinto desde el punto de vista petrográfico, es decir: las calcarenitas y gravelitas por su contenido de CaCO_3 se pueden considerar como caliza margosa o marga calcárea. Las limolitas con intercalaciones de poca potencia de arenisca y arcilita corresponden con marga o marga calcárea. Tomando en consideración la presencia de los granos de caliza en las areniscas hay que constatar que éstas se pueden incluir químicamente en el grupo de las margas, lo mismo se puede decir sobre los conglomerados de grano no muy grueso.

Los tipos de rocas arriba mencionados representan la estratificación del tipo “flysh” típica para la época del Cretácico, Paleoceno y eoceno inferior, mientras que dentro del neógeno no se encuentran los cambios litológicos tan frecuentes, de manera que las gravelitas y calcarenitas se pueden caracterizar químicamente como calizas margosas hasta margas calcáreas.

II.3.1.- Tectónica.-

El yacimiento se encuentra en la parte N – O del anticlinal Cabañas – Mariel con una longitud de 3 Km y una anchura de 1.2 Km. Las fallas que atraviesan la estructura del yacimiento fueron determinadas principalmente basados en:

- a) Mediciones geofísicas*
- b) Perforaciones de pozos*
- c) Por evidencias geológicas – estructurales.*
- d) Características morfológicas del relieve.*

Las fallas tectónicas se manifiestan por tres sistemas. Las fallas longitudinales son de dirección N – S y las transversales de dirección NO – SE y SO – NE. Las capas de rocas tienen dirección predominante N – S de 5 - 15° (máximo 35°) al este, NE o SE. En la estructura general de las rocas del Cretácico superior se manifiesta una ondulación fuerte de las capas; la altura del salto de estas fallas alcanza de 5 a 30 m.

Generalmente podemos hacer la conclusión de que el origen de las fallas está determinado por las propiedades físico mecánicas de las rocas. Las fallas principales o más importantes han tenido lugar en las rocas de mayor dureza o resistencia, como las calizas coralinas y caliza compacta estratificada.

II.3.2.- Génesis del yacimiento.-

En el yacimiento afloran solamente las rocas sedimentarias predominando los sedimentos carbonáticos, argilitas, margas que se encuentran en la parte oeste del yacimiento.

Las rocas intrusivas (serpentinita, porfiritas, tobas, etc.) del Cretácico superior en el yacimiento no se encuentran.

Dentro de las sedimentaciones Cretácico superior y terciaria existen algunas discordancias, entre las cuales están desarrollados siempre algunos de los ciclos sedimentarios.

A. El Cretácico superior está representado por:

- 1. Los estratos de argilitas, limolitas y margas de color gris hasta negro. Los distintos tipos petrográficos en los estratos se alternan irregularmente y sus potencias de 1 cm hasta 1m.*
- 2. Los estratos de margas, margas calcáreas y caliza margosa de color gris y gris claro están caracterizadas por la presencia de margas calcáreas.*

B. Paleógeno – Neógeno.

Los sedimentos paleógenos fueron depositados en las capas subyacentes ya erosionados del Cretácico superior.

- 1. Las argilitas, limolitas, areniscas y conglomerado de color gris y pardo forman capas de potencia muy variable, las cuales están muy desarrolladas en el área del yacimiento.*
- 2. Los estratos de margas, margas calcáreas y caliza margosa de color crema, se sedimentaron en el piso ondulado de las argilitas, limolitas, areniscas pardas o rocas cretácicas.*
- 3. En el período siguiente se formaron grandes arrecifes coralinos, restos de los cuales se encuentran en la zona del yacimiento formado por calizas coralina cavernosa compacta de color crema, crema blanco o rojizo.*
- 4. Los estratos de caliza margosa, caliza blanda y caliza compacta estratificada de color crema, crema claro son miembros superiores de la sedimentación del neógeno en el yacimiento. Están caracterizadas por la sedimentación rítmica y yacen en los alrededores de estos arrecifes coralinos.*

II.3.3.- Condiciones hidrogeológicas.-

II.3.3.1.- GENERALIDADES.-

Las rocas calcáreas de la formación Martín Mesa y las rocas arenosas del Cretácico superior son fuentes de reservas para aguas subterráneas.

De acuerdo a las formas de clasificación esta agua son aguas subterráneas filonianas en especial aguas de fisuras, siendo zonas fracturadas tectónicamente y muy diaclasadas.

Las capas del Paleógeno y Eoceno inferior tienen poca capacidad acuífera (areniscas, limolitas, argilitas).

El Oligoceno – Mioceno como hemos comprobado y según se puede observar en el mapa hidrogeológico de Cuba generalmente contienen mucha agua.

Las rocas del Mioceno son muy pródigas en agua potable catalogadas como capas muy acuíferas donde existen numerosos pozos que se utilizan.

Las aguas subterráneas de los sedimentos cuaternarios de la región no son utilizadas como agua potable.

II.3.3.2.- CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LA REGIÓN.-

El área estudiada como se desprende de la explicación anterior representa un rectángulo cuyo largo, el occidental, se extiende a lo largo de la Bahía del Mariel y el corte septentrional da al Golfo de México.

La superficie está un poco ondulada con los cortes de 100 x 100 m.

En el oeste y el norte el área tiene pendientes abruptas hacia la Bahía de Mariel y en el este se observa una inclinación más suave hacia el valle del Río Mosquito.

En el sur y sudoeste fuera de los límites del yacimiento, la superficie del terreno está inclinada hacia el valle del Río Bongo, donde alcanza las cotas de 10 m y menos.

De este modo el yacimiento representa una zona elevada del terreno, limitada por todos lados por una red hidrográfica y la cuenca marítima. Esto determina por una parte las condiciones desfavorables para el abastecimiento de los horizontes acuíferos, y por otra parte contribuye a un drenaje intenso de las rocas acuíferas.

Las argilitas mencionadas son débilmente permeables y sobre ellas descansan rocas carbonáticas del oligoceno – mioceno con una composición muy compleja.

En la cantera donde se realiza la explotación en el flanco occidental y norte del yacimiento, no se observan afluencias de agua (+ 5 m S.N.M.M.).

Las aguas subterráneas se mueven en la dirección norte hacia la inmersión del norte de la estructura. Sin embargo la zona de saturación principal no alcanza la zona del yacimiento ya que se dirige parcialmente siguiendo el rumbo del buzamiento de las argilitas, margas y areniscas que están por debajo de las rocas acuíferas, hacia el Río Mosquito, alimentándolo y corriendo por una depresión del relieve hacia el valle del Río Bongo y la Bahía del Mariel.

Durante la explotación en la mayor parte del yacimiento no habrá grandes obstáculos en cuanto a la afluencia de agua. La composición química del agua hidrocarbonática, cálcica con la mineralización de 0.559 g/ litro.

CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA.-

III.1.- INTRODUCCIÓN.-

A través del tiempo y con el desarrollo de la geomatemática y los sistemas automatizados también se han potenciado los métodos geoestadísticos para el estudio de variables regionalizada hasta llegar a los procedimientos tan avanzados como son la estimación automatizada y más tarde la simulación. Teniendo a nuestra disposición un conjunto de muestras tomadas en puntos de un dominio cualquiera, que representa una manifestación mineral estudiada o no y que se consideran representantes de la realidad, que por lo general es desconocida. Los semivariogramas son la herramienta fundamental de la geoestadística, y el ajuste de los mismos, a una curva conocida, nos permite caracterizar las variables con dos propósitos bien distintos: El primero, es proporcionar valores estimados en los lugares de interés pero, que sean valores precisos y exactos y en segundo lugar, crear valores que de forma relacionada tengan iguales propiedades y/o características de dispersión que los datos primarios (Cuador et al, 1999; Cuador, 2002). Ahora, cualquiera sea el método que se utilice en la estimación, el soporte en que se sustenta el cálculo es la unidad de selección minera. Su definición de forma adecuada influye en la precisión y exactitud, en nuestra opinión de forma determinante.

En este capítulo pretendemos abordar estos temas y la forma en que se pueden relacionar con la precisión y la exactitud de la estimación haciendo uso de los procedimientos de estimación y simulación geoestadística, ilustrándolo con el caso de estudio que nos compete.

III.2.- ELEMENTOS PARA LA APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA.-

Los pasos presentados en este capítulo pueden ser aplicados para conocer la influencia del tamaño de la Unidad de Selección Minera (USM), en la precisión y exactitud de la estimación, in situ, de algún parámetro o propiedad medida en localizaciones de su dominio. La aplicación de la Geoestadística tiene como propósito, lograr la mejor estimación verosímil y/o probable a partir de la información disponible como resultado de los trabajos de exploración (Armstrong y Roth, 1997; de Fouquet, 1996; Christakos y

Raghu, 1996; Christensen, 1993). Esta estimación se obtiene, tomando en cuenta las características estructurales del objeto de estudio.

Es obviamente común que las mediciones de una variable tengan una posición en el espacio, es decir, sean georeferenciadas, esta propiedad las diferencia del resto de las variables estadísticas, y por esta razón son llamadas **variables regionalizadas** (Matheron, 1970).

Cuando estimamos variables al interior de un bloque o USM, en un modelo geométrico de un depósito cualquiera, necesitamos realizar una **Estimación de bloque**, donde se obtiene el valor medio de la propiedad, bajo estudio, para cada uno de los bloques, definidos para los límites físicos del modelo geológico, en paralelepípedos de tres dimensiones.

Los bloques a estimar deben estar al interior de un rectángulo que envuelva el dominio, con el objetivo de contornear la zona de interés, es decir, seleccionar los bloques que están dentro de los límites físicos de modelo geológico o de la región de estudio, que en el caso minero no es más que la zona mineralizada de interés.

En esta aplicación de la geoestadística, se recorren cinco etapas fundamentales que se adoptan en aras de resolver nuestro problema particular. En el flujo sinóptico de la figura 3.1 se muestra la relación entre éstas y se describen en los epígrafes siguientes. Estas etapas son: 1.- Conocimiento del problema. 2.- Análisis estructural. 3.- La estimación. 4.- La simulación. y 5.- Análisis de los resultados.

III.3.- CONOCIMIENTO DEL PROBLEMA.-

Una vez que obtuvimos los datos, fue necesario controlarlos exhaustivamente para verificar su exactitud, esto representó que todos los errores numéricos fueron corregidos en la base de datos, fue muy importante, además de estar familiarizado con el problema a solucionar, el hecho de haber participado en la confección de un proyecto minero, realizado con anterioridad a este trabajo.

Al inicio del estudio nos fue indispensable estudiar todos los elementos necesarios, con el objetivo de precisar: La geología del yacimiento, el tipo ó método de muestreo empleado, si

la zona es geológicamente homogénea o si existen heterogeneidades de diferente naturaleza como la presencia de estratificación del tipo “flysh” ó fallas grandes, entre otras, si zonas de valores grandes han estado privilegiadas por las mediciones, y si éstas mediciones son representativas de la realidad objeto de estudio.

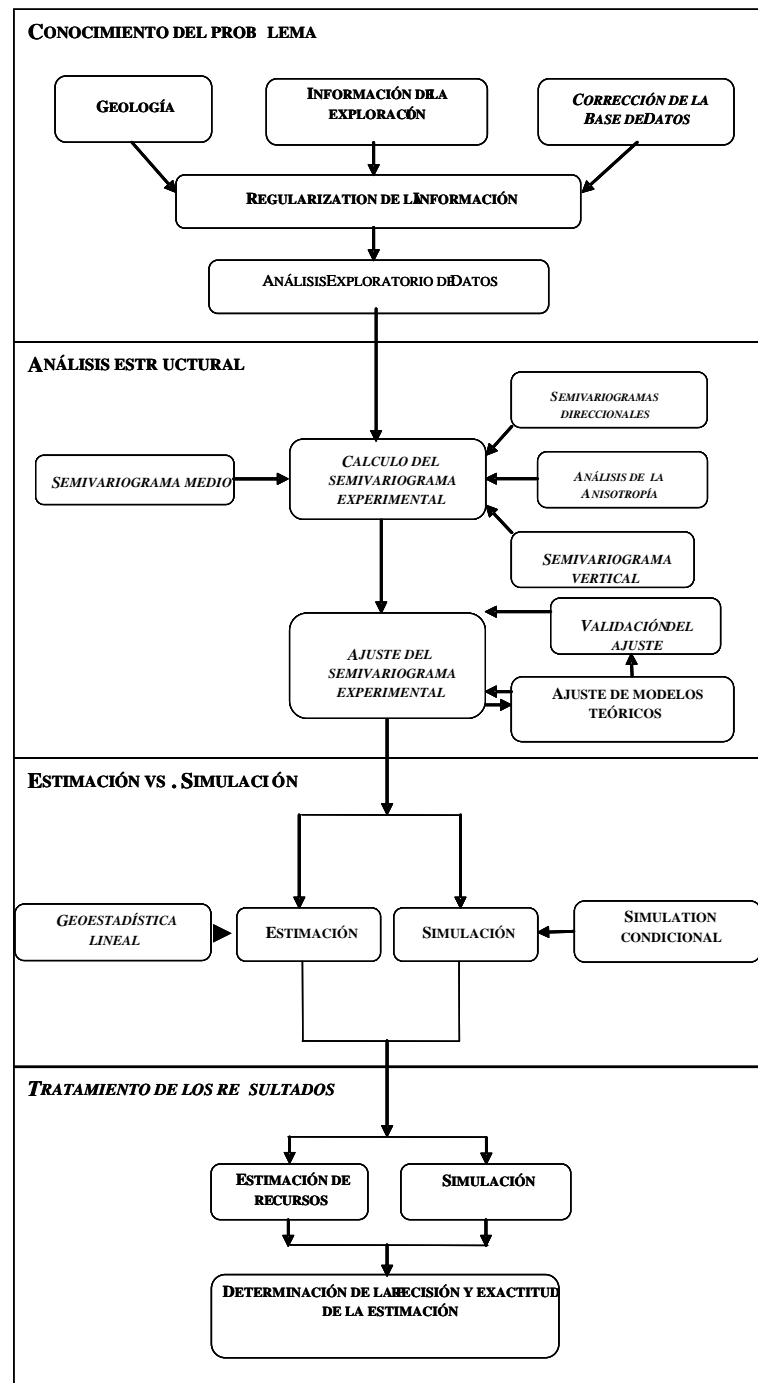


Figura No. III-1 Elementos que integran nuestro estudio Geoestadístico.-

Todo esto nos permitió realizar una conveniente regularización de la información y un detallado análisis exploratorio de datos.

Esta fase incluyó los siguientes pasos:

- 1.- Estudio geológico del problema.*
- 2.- Introducción de la información de exploración en soporte magnético.*
- 3.- Corrección numérica de la información en soporte magnético.*
- 4.- Regularización de la información.*
- 5.- Análisis exploratorio de datos.*

III.3.1.- Estudio geológico del problema.-

Para la aplicación efectiva de la geoestadística es un requisito cardinal tener conocimiento de la estructura geológica en que se desarrolla la mineralización (David, 1977; Journel y Huijbregts, 1978). Esto incluye, para el caso minero, la génesis del yacimiento y las rocas encajantes, entre otros. Si los datos engloban información de una misma estructura geológica y/o la ocurrencia de fenómenos tectónicos pretéritos provocó la pérdida de la continuidad espacial, entonces la información debe ser dividida y estudiada como poblaciones independientes.

Según Journel y Huijbregts (1978) nuestro deposito estudio pertenece a la generalización según la forma del cuerpo mineral siguiente:

Cuerpo estratiforme: Tienen como característica fundamental que la estructura de la mineralización y la disposición de los datos disponibles en el espacio tridimensional favorecen una dirección respecto a otra, esto es, el espesor de la mineralización es mucho menor que las dimensiones en el plano del cuerpo. Estos cuerpos también son conocidos como tabulares, lenticulares. Pueden ser estudiados de forma bidimensional y tridimensional.

*En el caso que nos ocupa o sea, el deposito “Mariel” es, definitivamente, del **tipo estratiforme** y lo estudiaremos de forma tridimensional.*

III.3.2.- Información de exploración.-

La información obtenida de los trabajos de exploración en la actividad geólogo – minera comprende el resultado de los análisis químicos, fundamentalmente de los testigos de perforación, información que organizamos según la tabla 3.1, teniendo en cuenta su compatibilidad con el software GEMCOM que es el que utilizamos para realizar la estimación de la variable utilizada en este estudio.

Tabla No. III-1 Organización de la información de exploración minera.

<i>No. Pozo</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Profundidad</i>

<i>No. Pozo</i>	<i>Desde</i>	<i>Hasta</i>	<i>Longitud</i>	<i>No. Muestra</i>	<i>Variables</i>

<i>No. Pozo</i>	<i>Desde</i>	<i>Hasta</i>	<i>Litología</i>	<i>Propiedades</i>

<i>No. Pozo</i>	<i>Desde</i>	<i>Hasta</i>	<i>Acimut</i>	<i>Inclinación</i>

III.3.3.- Corrección numérica de la información en soporte magnético.-

La calidad de la información primaria, es un elemento importantísimo a tomar en cuenta en el almacenamiento de la información, tanto aquella procedente de informes como la de formato digital, ya que ésta va a determinar la autenticidad de los resultados (Armstrong y Carignan, 1997). Antes de comenzar el procesamiento de la información debe controlarse y corregirse toda la información numérica, lo cual resulta de gran importancia debido a que, un error en la etapa inicial se reflejará sistemáticamente durante todo el estudio, “...si basura entra, basura sale...”. La herramienta informática a utilizar (GEMCOM Desktop Edition versión 4.11) en este proyecto puede detectar anomalías en la información, generando un fichero con los resultados de la validación de la base de datos, informando al usuario de cualquier anomalía en los mismos como es la inexistencia de un intervalo, duplicidad en los datos, inconsistencia o ambigüedad en la información revisada, etc.

III.3.4.- Regularización de la información.-

Atendiendo a que frecuentemente los testigos de perforación no tienen siempre la misma longitud, fue necesario y absolutamente indispensable homogenizar o regularizar el soporte de los datos (longitud de las muestras) de forma tal que, la diferencia en espesor de las muestra no interfiera con la precisión y exactitud de la experimentación variográfica.

Existen dos reglas fundamentales para regularizar los datos:

- 1.- La longitud del intervalo regularizado NO DEBE SER MENOR que la media de la longitud original del muestreo.*
- 2.- La longitud del intervalo regularizado DEBE SER MULTIPLO de la altura del banco de extracción minera.*

Se calculó entonces una media ponderada a intervalos de igual longitud para cada pozo en la zona mineralizada. Todo esto permitirá realizar un análisis de la variabilidad espacial en soportes iguales. A este proceso se le llama regularización de la información.

III.3.5.- Análisis exploratorio de datos.-

Una vez que tuvimos conocimiento del problema, poseíamos los datos corregidos, y la información estaba regularizada, procedimos a calcular la estadística básica a fin de determinar homogeneidad en la información. Buscar valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento geoestadístico.

III.4.- EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.-

El estudio de variabilidad o análisis estructural, es la fase fundamental del estudio geoestadístico. Este tiene como objetivo determinar las características estructurales del fenómeno estudiado, utilizando la herramienta más efectiva de que se dispone: el semivariograma experimental. Posteriormente se mostraran las características de correlación espacial y variabilidad utilizando los modelos teóricos de semivariogramas (Armstrong y Carignan, 1997; Cuador et al, 1999; Quintero et al, 2000; Cuador 2002).

La variabilidad espacial, entendida ésta como la discrepancia entre atributos cualitativos (geológicos) y cuantitativos (estadísticos) entre pares de puntos en el espacio 3D, es mínima cuando la distancia, entre estos pares tiende a cero, y alcanza su valor máximo o meseta a una distancia “a” entre esos puntos denominada “alcance”. Específicamente, mas allá del alcance “a”, la discrepancia entre las características asociadas con pares de puntos separados por distancias mas allá de “a” es, en promedio, independiente de la distancia entre ellos, en otras palabras, podemos decir entonces, que el valor de un punto es independiente del valor del otro. Este análisis puede ser aplicado cualquier tipo de variable regionalizada, y es absolutamente indispensable, complementarlo con la interpretación geológica (Sahin et al., 1998). Esta etapa incluye los siguientes pasos: 1.- El cálculo del semivariograma experimental, 2.- El ajuste con modelos teóricos conocidos.

III.4.1.- Cálculo del semivariograma experimental.-

El procesamiento de los datos utilizando el semivariograma experimental tiene como propósito revelar las características de continuidad espacial del fenómeno en estudio, es decir, tener conocimiento de cómo varía el valor de la variable de una localización a otra. Interpretándolo como una medida vectorial de distancia estructural, es posible usarlo para

descubrir direcciones de máxima y mínima continuidad. También permite descubrir la conducta del fractal potencial, o hacer una estimación cuantitativa sobre el grado de suavidad desplegada por la variable. Este representa la herramienta más importante para el desarrollo del análisis estructural (Weerts y Bierkens, 1993; Sahin et al., 1998). Los parámetros a tener en cuenta para el cálculo son: el incremento (lag en inglés), la tolerancia lineal, la cual debe ser la mitad del incremento inicial y las direcciones de cálculo con sus correspondientes tolerancias angulares. Es importante significar que el semivariograma debe ser calculado hasta aproximadamente la mitad de la distancia máxima entre las muestras, según la dirección de cálculo. Este hecho se debe a que a partir de esta distancia la cantidad de pares comienzan a disminuir y la información que se aporta deja de ser estadísticamente significativa. Para el incremento, para cuyos múltiplos se calculan los valores del semivariograma, es recomendable que se tome la distancia promedio entre localizaciones contiguas (Quintero, 2001 y Cuador, 2002).

En esta fase se incluyen los elementos subsiguientes, los que se complementan mutuamente:

1.- Cálculo de semivariogramas medios o globales, 2.- Cálculo de semivariogramas direccionales, 3.- Análisis de anisotropías, y 4.- Cálculo del semivariograma vertical.

III.4.1.1.- CÁLCULO DE SEMIVARIOGRAMAS MEDIO O GLOBALES.-

El semivariograma medio u “omnidireccional” conocido también como semivariograma isotrópico o global, utiliza tolerancia angular de 90° , lo cual hace que sus valores para cada paso sean iguales para cualquier dirección analizada su objetivo es proporcionar la variabilidad espacial de los datos de forma global, sin hacer énfasis en alguna dirección en particular. Es el más eficaz para obtener un comportamiento espacial estructurado y prevenir sobre la existencia de semivariogramas direccionales erráticos, por lo que se debe calcular al inicio del análisis. Si este semivariograma no produce una estructura definida, no se debe aguardar por un mejor resultado de los semivariogramas direccionales, en este caso es importante descubrir las causas del carácter errático de los semivariogramas (Armstrong y Carignan, 1997; Cuador, 2002).

III.4.1.2.- CÁLCULO DE SEMIVARIOGRAMAS DIRECCIONALES.-

Los semivariogramas direccionales tienen como finalidad realizar al análisis de la variabilidad de la información, dirigiendo la atención en una dirección particular. Utilizan tolerancia angulares menores de 90°, lográndose de esta forma el análisis de la anisotropía (Tulcanaza, 2000; Clark et al, 2001; Cuador, 2002).

III.4.1.3.- ANÁLISIS DE ANISOTROPÍAS.-

Para buscar diferencias en el comportamiento espacial, en las diferentes direcciones del plano de la mineralización, se efectúa el análisis de anisotropía. Esto significa calcular varios semivariogramas, los cuales, pueden realizarse en cuatro direcciones separadas 45° una de la otra, con tolerancia angular de 22.5°, o en ocho direcciones separadas 22.5° con tolerancias angulares 11.25° u otras combinaciones, comenzando por la dirección 0° hasta encontrar la dirección de mayor y menor continuidad espacial. Los semivariogramas calculados deben ser ploteados en un mismo gráfico (Clark et al 2001; Cuador, 2002).

Cuando los semivariogramas obtenidos de esta forma no muestran diferencias significativas, el fenómeno se considera isotrópico, y el comportamiento de su variabilidad puede ser representado por el semivariograma medio correspondiente.

III.4.1.4.- CÁLCULO DEL SEMIVARIOGRAMA VERTICAL.-

Este cálculo tiene como propósito revelar la continuidad espacial en la dirección perpendicular al plano de la mineralización, a lo largo de los pozos de perforación. Al encontrarse una muestra a continuación de la otra el semivariograma vertical se convierte en la herramienta que mejor expresa la verdadera relación de continuidad espacial.

Es muy común encontrar una dirección que juega un papel diferente a la del resto, y es recomendable analizar esta dirección por separado. En nuestro estudio lo haremos a través del semivariograma vertical, sobre el mismo soporte en que fue analizada la variabilidad horizontal. El semivariograma obtenido será usado en el proceso de estimación por Krigeaje en tres dimensiones (Armstrong y Carignan, 1997; Cuador, 2002).

III.4.2.- El ajuste de modelos teóricos.-

Los resultados obtenidos con los semivariogramas experimentales no pueden ser utilizados de forma directa en el proceso de estimación, para hacerlo deben ser ajustados previamente con modelos teóricos. Este proceso se realiza de forma visual, y el ajuste debe ser validado. Los modelos teóricos utilizados deben ser los aprobados, es decir, aquellos que sean “definido positivo”, si no se tiene en cuenta esto se corre el riesgo de tropezar con varianzas negativas (Cressie y Grondona, 1992; Deutsch, 1994; Armstrong y Carignan, 1997; Wackernagel, 1995; Cuador, 2002).

Esta etapa incluye los siguientes pasos:

1. Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental obtenido.
2. Validación del modelo ajustado.

III.4.2.1.- AJUSTE DE MODELOS TEÓRICOS AL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL.-

De forma general esta operación se desarrolla de forma visual, aproximando modelos conocidos de semivariogramas a los puntos experimentales, donde debe obtenerse el valor del **efecto pepita**, si existe, además de un **modelo de semivariograma** para cada estructura ajustada con sus respectivos parámetros **meseta y alcance**.

El ajuste de modelos teóricos de semivariogramas tiene como objetivo obtener un modelo que represente las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado a través de una expresión analítica. Se recomienda el uso de modelos autorizados y el ajuste visual, durante el proceso de validación. Al final debe obtenerse uno o varios modelos de semivariogramas con los respectivos valores de meseta y alcance, expresados en la siguiente ecuación:

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = C_o + \sum_{i=1}^n C_i \cdot \text{Modelo}_i(a_x, a_y, a_z) \text{ donde: } C_o \text{ es el efecto de pepita; } C_i \text{ la meseta;}$$

Modelo esta referido al modelo teórico utilizado en el ajuste del semivariograma con los alcances en las tres direcciones posibles y n es el número de estructuras utilizadas en el ajuste.

El modelo obtenido debe caracterizar fielmente los aspectos que se suponen importantes del semivariograma experimental, los cuales serán usados posteriormente en el proceso de estimación y simulación. (Journel y Huijbregts, 1978; Dubrule, 1994; Echaabi et al, 1995 ; Cuador, 2002).

III.4.2.2.- VALIDACIÓN DEL MODELO AJUSTADO.-

*El modelo ajustado en la fase anterior debe ser validado el método de validación cruzada (Lajaunie, 1997; Bacchi y Kottegoda, 1995; Kiyono y Suzuki, 1996; Host et al., 1995; Madani, 1998; Carr, 1995). Esta táctica consiste en eliminar, temporalmente, el valor de una localización en la data inicial y reestimar éste valor, por Krigeaje, a partir de la información restante, repitiendo el proceso para cada punto muestreado. De esta manera se obtiene un error de estimación expresado por la diferencia de los valores reales y los estimados para cada dato disponible. **En el caso de conjuntos de datos con un gran número de muestras no es imprescindible realizar una validación del modelo ajustado, como es el caso estudio que nos compete (Cuador, 2002).** Es convenientemente importante detallar la continuidad espacial a pequeñas distancias y el comportamiento del semivariograma en el origen, teniendo en cuenta la peculiaridad del Krigeaje de conceder mayor peso a las muestras más cercanas a la localización o bloque que se desea estimar, que a las más distantes.*

El análisis estructural finaliza cuando obtenemos una validación admisible de acuerdo a los criterios mencionados o un análisis correcto de la estructura espacial y se tiene un modelo para ser utilizado en la estimación y la simulación.

III.5.- ESTIMACIÓN Y SIMULACIÓN.-

Cuando poseemos un modelo que describe la variabilidad espacial de la variable bajo estudio, el mismo es utilizado para realizar la estimación y la simulación.

III.5.1.- Estimación.-

El objetivo de la estimación es entregar en cada punto de la red, un valor lo más próximo factible del valor real y desconocido, a través del estimador Krigeaje, el cual se

implementa en este caso para bloques y requiere además, del modelo de continuidad espacial, una vecindad de búsqueda para evitar un exceso de efecto de pantalla en el Krigeaje (Arik, 1990; Schaug et al., 1993). Para el caso que nos ocupa, que es la estimación del valor de una variable en un depósito mineral sólido, es adecuado utilizar el Krigeaje Ordinario de bloques, el cual brinda buenos resultados, cuando la información inicial presenta homogeneidad estadística y el espaciamiento entre los datos es del orden de la correlación espacial entre los mismos (Chica-Olmo, 1987).

En este proceso se obtiene para cada bloque estimado un error de estimación, **la varianza de Krigeaje**, como criterio de la certidumbre de la estimación realizada (Armstrong y Carignan, 1997), que diferencia esta técnica de otros métodos de interpolación (de Fouquet, 1996). Se realizarán estimaciones para cada tamaño de bloque seleccionado para hacer este estudio con el objetivo de comparar estos resultados con los de la simulación condicional.

III.5.1.1.- GEOESTADÍSTICA LINEAL.-

En la geoestadística lineal se obtienen valores estimados a partir de una mezcla lineal de pesos asociados a los datos disponibles utilizados en la estimación. Cuando la información muestra características de estacionariedad incuestionables se utilizan los datos originales en la estimación, existiendo las variantes: Krigeaje Simple y Krigeaje Ordinario, las cuales pueden ser implementadas de forma puntual o de bloque. (Armstrong y Carignan, 1997). En nuestro caso, para ejecutar el proceso de estimación, utilizaremos Krigeaje Ordinario de Bloque.

III.5.2.- Simulación.-

Cuando el área bajo el estudio es un modelo de bloques y el atributo es estimado por kriging a cada celda en el modelo geométrico, se obtiene un mapa estimado. A partir de que la estimación de cada localización es realizada como una función exclusiva de los datos, las estimaciones en localizaciones cercanas son muy similares, dado que los pesos no varían abruptamente. Como consecuencia, el mapa resultante es una versión lisa de la realidad, la cual es muy apropiada para descubrir tendencias de gran potencia y las estimaciones globales. Sin embargo, el modelo estimado no es una representación creíble

de realidad, el mismo no es ninguna de las posibles realizaciones del modelo de función aleatoria.

La **simulación estocástica** se usa cuando deseamos generar una (o muchas) realización(es) que se parezcan a la realidad, es decir, que desplieguen el mismo tipo de variabilidad espacial observada en los datos y modelada por el variograma. La premisa de la simulación es que todas las realizaciones generadas son igualmente probables según el modelo de función aleatoria adoptada y, en este sentido, cualquiera de ellos podría tomarse como la realidad. Realizaciones generadas por simulación estocástica son típicamente usadas como la entrada a los ejercicios de Monte-Carlo.

Especialmente cuando se desea analizar fenómenos que no dependan linealmente del parámetro bajo estudio. Esta se obtiene a partir de las características de dispersión del fenómeno real, puestas al descubierto por la información disponible (Lantuéjoul, 1997 y 1998; Rivoirard, 1998). Es muy importante enfatizar que en cada localización el valor simulado $Z_s(x)$ no es el mejor valor estimado de $Z(x)$ que se puede obtener, por lo que para la estimación de recursos minerales el valor empleado debe ser el estimado o el promedio de un gran número de simulaciones (Cuador et al., 2000 y 2001; Cuador, 2002).

III.5.2.1.- SIMULACIÓN CONDICIONAL.-

El desarrollo de este procedimiento incluye, primero, la generación de valores con iguales características de variabilidad y correlación espacial que las obtenidas de los datos originales en el proceso de análisis estructural, esto es una simulación no condicional. Los valores simulados de esta forma son posteriormente condicionados a los datos reales. Este proceso en la generalidad de los sistemas se desarrolla de forma conjunta, permitiendo obtener una de las realizaciones del fenómeno real, de la cual, la realidad desconocida también es considerada una realización (Quintero et al., 2000; Cuador et al, 2000 y 2001; Cuador, 2002). Para nuestro trabajo realizaremos una simulación condicional gaussiana, a la que llamaremos realidad desconocida y promediaremos los resultados para cada tamaño de USM seleccionado, utilizando el método de ventanas móviles.

III.6.- TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS GEOESTADÍSTICOS.-

En esta última etapa se comparan los resultados de las estimaciones obtenidas del procesamiento Geoestadístico para cada tamaño de bloque, con el promedio obtenido a partir de los datos simulados para ese mismo tamaño de bloque, con el objetivo de conocer la precisión y la exactitud de la estimación realizada con el Krigeaje.

Para lograr lo anterior se construirán nomogramas del promedio de los errores calculados versus los diferentes tamaños de USM. Esto nos permitirá visualizar una curva donde el valor mínimo representará la Unidad de Selección Minera mas adecuada para la estimación de los recursos de este depósito. Con esto se demostrará la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación. No debemos confundir aquí el valor mínimo con el obtenido para cuando el tamaño de la USM coincide con el espaciamiento de la red.

Otro procedimiento consiste en estimar los recursos globales para el área de estudio utilizando los posibles valores reales obtenidos por la simulación y los valores estimados por Krigeaje. De este modo se puede encontrar para que tamaño de USM sea mínima la diferencia de los recursos estimados. Si los resultados de estas dos últimas operaciones coinciden encontramos sin lugar a dudas la USM más racional desde el punto de vista geomatemático.

III.7.- SISTEMAS PARA EL PROCESAMIENTO GEOESTADÍSTICO.-

Es absolutamente necesario la utilización de sistemas automatizados para ejecutar un proceso geoestadístico, debido a la gran cantidad de cálculos que se realizan y al volumen de datos que se generan. Las fases descritas anteriormente pueden ser ejecutadas en cualquier sistema disponible, para el modelaje geológico y procesamiento geoestadístico o geomatemático, aunque es valido aclarar que todos los sistemas existentes no tienen las mismas prestaciones o herramientas, implementadas para dicho trabajo. Existen sistemas profesionales que, tienen posibilidades limitadas dirigidas a profesionales no avezados en la temática. En nuestro trabajo utilizamos varios sistemas que tienen amplia difusión mundial, algunos de ellos son muy conocidos por los profesionales que, en Cuba, se

dedican a estos menesteres y uno de ellos fue diseñado específicamente para este trabajo, estos sistemas se describen brevemente a continuación:

GEMCOM System v. 4.11 para Windows: Es un sistema de softwares integrados para la administración de datos de exploración y análisis, modelado de sólidos y planeación de producción minera. El paquete permite manejar, manipular y ver los datos de todas las fases de la exploración y el proceso minero.

Gemcom para Windows es un sistema de administración de datos de exploración diseñado para guardar, manejar, hacer informes, desplegar y hacer análisis estadísticos y geoestadísticos un tanto limitados, a cualquier tipo de datos espaciales y combinarlos con cualquier dato cualitativo o cuantitativo. Proporciona una extensa facilidad de corrección de gráficos y otras herramientas prácticas para hacer todos los aspectos de geológico y modelado de reserva de mena, y el diseño de minas a cielo abierto y la planificación de la mina subterránea y su diseño, rápido, flexible y fácil de entender.

Geostatistical Library, GsLib 90: Puede ser utilizado para el procesamiento Geoestadístico integral, fundamentalmente en el proceso de análisis estructural, la estimación por Krigeaje puntual y de bloque en las variantes más usada actualmente y la simulación geoestadística. No posee ambiente visual para el procesamiento y no ofrece posibilidades para el modelaje de cuerpos geológicos, la GsLib ofrece, en el procesamiento geoestadístico, ventajas superiores a los sistemas geólogo mineros más populares en la actualidad. La filosofía de trabajo de este sistema se concentra en la definición ficheros de entrada, la ejecución del programa ejecutable y la interpretación de los resultados de ficheros de salida, resultados que pueden ser visualizados con aplicaciones propias de la GsLib o auxiliándose de otros sistemas. (Deutsch y Journel, 1998).

S-GeMS v. 1.4, (Geostatistical Earth Modeling Software): Es un ejemplo de software construido de sobre la base de la GsTL. El código fuente de S-GeMS es un ejemplo de cómo usar las facilidades de las GsTL.

S-GeMS fue diseñado con dos objetivos en mente. El primero, orientado hacia el usuario final, es proporcionar un software de uso fácil que ofrece un rango grande de herramientas geoestadísticas: Se implementaron los algoritmos geoestadísticos más comunes y los más

recientes como los desarrollados para la simulación estadística de múltiples puntos. La amigabilidad usuario - S-GeMS viene principalmente de su interfaz gráfica no obstrusiva, y la posibilidad de que el usuario visualice, directamente, conjuntos de datos y resultados en un completo ambiente 3-D interactivo. El segundo objetivo fue diseñar un software que pudiera aumentar las funcionalidades convenientemente. Los rasgos nuevos pueden agregarse en S-GeMS a través de un sistema de plug-in, es decir, pedazos de software que no puede ejecutarse solos, pero puede complementarse con el software principal.

En el S-GeMS, los plug-in pueden usarse para agregar nuevas herramientas geoestadísticas, agregar nuevos datos del modelo de bloques o grilla o definir nuevos filtros para la importación o exportación.

GEOSTAT SYSTEMS versión 1.20: Es una poderosa herramienta que permite, entre otras muchas opciones, computar y trazar variogramas experimentales, para cualquier cantidad de puntos de entrada, en 10 direcciones al mismo tiempo, con su herramienta VARIO 3. En cada dirección definida por un acimut y ángulo de la buzamiento, un ángulo de tolerancia, incrementos y números de incrementos seleccionados. Otras opciones incluyen la transformación (lognormal o indicador) y el cómputo de medogramas, rodogramas o covarianzas espaciales en lugar del variograma. La aplicación VARIO3 permite ajustar un modelo 3D interactivamente al variograma experimental. El Modelo depende de hecho de cinco componentes de varios tipos (esférico, exponencial, etc.) con un valor del umbral y a tres valores del rango y tres ángulos de la rotación. Las curvas experimentales y los modelos son desplegados constantemente en la pantalla.

STATISTICA 6.0: Es uno de los softwares más comprensivos, para análisis integrado de datos, gráficos, administración de la base de datos, y sistemas de desarrollo de aplicaciones personalizado, que ofrecen una selección inmensa de elementos esenciales y procedimientos analíticos avanzados para, negocios, datos de minería, ciencia, y aplicaciones de ingeniería.

STATISTICA no sólo incluye el propósito general de los procedimientos de dirección de datos estadísticos, gráficos, y analíticos, sino que también incluye las aplicaciones comprensivas de métodos especializados para el análisis de datos (por ejemplo, datos de

minado, negocios, sociológicos, para la investigación biomédica, o el diseño de aplicaciones).

CELDA MOVIL 3D v. 1.0: Este programa fue diseñado para realizar la estimación de promedios mediante el método de ventanas o celdas móviles y permite trabajar con ficheros en formato ASCII delimitado por comas y en formato GEOEAS. Entrega un fichero con el promedio estimado para el tamaño de celda seleccionado, la cantidad de datos con que se realizó la estimación y la varianza de estimación así como las coordenadas en las tres dimensiones X, Y y Z. Este útil y amigable programa fue creado por el ingeniero José Arias del Toro de la ONRM en el año 2006, para la realización de este trabajo.

III.8.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

Los aspectos considerados en este capítulo, para la aplicación de la geoestadística, son resultado de un análisis bibliográfico exhaustivo, que ligado a la experiencia acumulada en la solución de casos prácticos nos permitió configurar nuestro trabajo de investigación.

Seria imposible estimar variables geólogo – mineras sin el aporte fundamental que hace la geoestadística, teniendo como fuente las características estructurales de la información de exploración, o sea, las características de variabilidad y correlación espacial. Sin la herramienta imprescindible, el semivariograma experimental, seria imposible revelar estas características a partir de la información disponible, por supuesto que es imprescindible hacer el ajuste de dichos semivariogramas a modelos teóricos conocidos. Este definitivo componente es la piedra angular en el proceso de estimación, teniendo en cuenta insoslayablemente los límites físicos del modelo geológico que se presenta.

Es muy importante señalar que los epígrafes presentados deben ser ejecutados en el orden expuesto y teniendo en cuenta a su vez en los subepígrafes correspondientes. Estos últimos, dependiendo de los problemas prácticos en cuestión se utilizan conjuntamente e indistintamente para cumplir con los objetivos de los pasos III.3. Conocimiento del problema, III.4. Análisis estructural y III.5. Estimación y Simulación, para finalmente obtener los resultados deseados según el epígrafe III.3.6. Tratamiento de los resultados geoestadísticos.

CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.-

IV.1.- INTRODUCCIÓN.-

En este capítulo se aplica la metodología propuesta para demostrar como influye el tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de recursos en un sector del yacimiento Mariel. Se utilizan procedimientos conjuntos de estimación y simulación geoestadística, mostrándose en cada caso los pasos a seguir en cada método, en el caso de la estimación se utiliza el Krigeaje ordinario y en la simulación la secuencial gaussiana.

IV.1.1.- GENERALIDADES Y FUENTE DE LOS DATOS DISPONIBLES.-

La estimación del valor de la variable escogida y los recursos a ella asociados en este trabajo se realizó fundamentalmente, utilizando un sistema geólogo - minero automatizado llamado GEMCOM System, versión 4.11 para Windows.

Los datos disponibles para este trabajo son:

- *Datos de los pozos de perforación realizados hasta la actualidad en el yacimiento.*
- *Interpretación geológica del yacimiento representada en perfiles verticales y horizontales según Barkác Z. y Hasch J. (1976); y Gómez O. et al (2000).*
- *Actualización topográfica de la cantera “Mariel” a escala 1:1000*
- *Datos del reconocimiento Geólogo – Minero realizado por PROYEST y sus asesores.*
- *Proyecto Minero del yacimiento Mariel*

En el yacimiento “Mariel” se han realizado seis (6) campañas de perforación:

Tabla IV-1 Campañas de perforación en el yacimiento.-

Año	Cantidad de Pozos	Metros Perforados	Red utilizada	Pozos utilizados en el proyecto minero
1976	296	10517.0	Cuadrada 100 x 100, rómbica 50 x 100 y cuadrada 50 x 50 metros	261
1980	50	1059.9	Aprox. rectangular 50 x 25 metros	33

1982	110	2619.8	Por perfiles de forma aleatoria	66
1984	20	677.7	Aprox. cuadrada 25 x 25 metros	7
1988	58	2275.6	Cuadrada 25 x 25 metros	0
1995	19	342.31	Cuadrada 100 x 100 metros	19
Total	553	17490.0		386

Como se observa en la tabla anterior, no se utilizaron 167 pozos en la estimación de recursos para el proyecto minero, esto fue provocado fundamentalmente por las siguientes causas:

1. Existen muchos pozos fuera de los límites de la propiedad minera.
2. Existen pozos repetidos (igual posición espacial).
3. La campaña del año 88 fue eliminada en su totalidad debido a que solamente se realizó para el estudio de elementos nocivos en un pequeño sector de arcillas del centro del yacimiento.
4. Existencia de ambigüedad en la información aportada por pozos muy cercanos.

Los pozos de perforación de superficie se perforaron todos de forma vertical y están dispuestos en secciones verticales este – oeste, separadas cada 50.0 m. Los cortes están dispuestos transversalmente al rumbo del yacimiento.

IV.1.2.- DATOS Y SECTOR DE TRABAJO UTILIZADOS.-

Para realizar este trabajo, tomamos los datos localizados en un sector del depósito en aras de aumentar la rapidez de los cálculos del microprocesador, este sector se puede observar en el gráfico IV.1 y se enmarca en las siguientes coordenadas:

Tabla IV-2 Tabla de coordenadas para la estimación.-

X		Y	
MIN	321702.41	MIN	353846.66
MAX	322270.75	MAX	354652.84

Se utilizaron un total de 124 pozos de los 386 disponibles para un 32.12%, esto nos permitió trabajar con un total de 715 muestras para CaO, ubicadas solo, en las calizas del depósito. En el gráfico IV.2 se muestran los pozos y las muestras utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

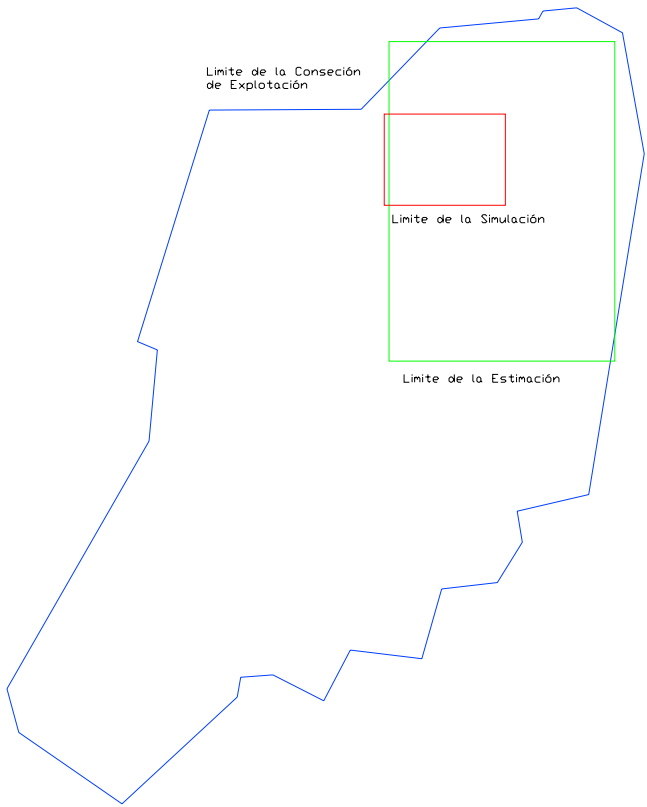


Gráfico IV-1 Límites de las áreas de trabajo.-

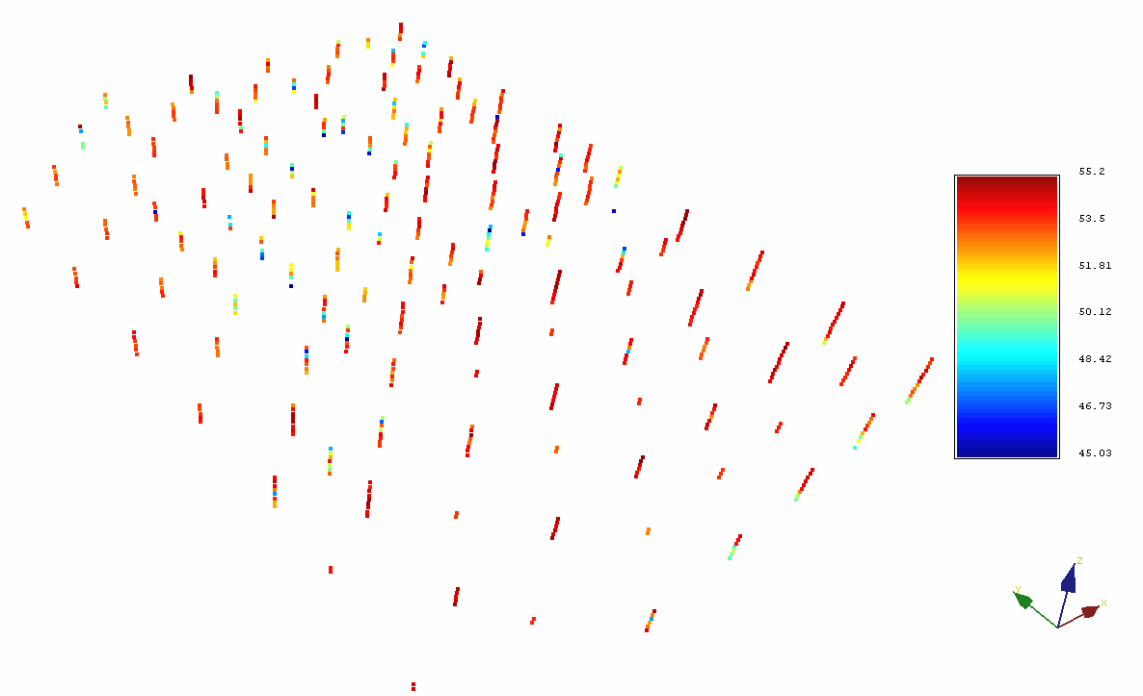


Gráfico IV-2 Pozos utilizados en el desarrollo de este trabajo.-

Para este trabajo solo se tuvo en cuenta el tipo geólogo - tecnológico clasificado como calizas según las especificaciones del usuario de la materia prima, que es la fábrica de cementos “Mariel”.

IV.1.3.- PERFORACIÓN, MÉTODOS DE MUESTREO, ANÁLISIS BÁSICOS Y DE CONTROL.-

IV.1.3.1.- PERFORACIÓN.-

Se empleo el método de perforación a columna en todos los pozos. Todos los pozos son verticales y se emplearon los siguientes diámetros en su construcción:

0.0 – 1.00 m = 151 mm

1.0 – final = 131, 111 y 97 mm según la profundidad del pozo.

IV.1.3.2.- MUESTREO.-

En todo el yacimiento fueron muestreados 553 pozos que generaron 3933 muestras para análisis completos. El intervalo promedio de muestreo fue de 4.0 m. Las muestras se tomaron de una mitad longitudinal del testigo, envasadas en sacos de papel, debidamente marcados con intervalos de muestreo, numero de pozo, numero de muestra y nombre del yacimiento. Las muestras fueron enviadas al laboratorio Isaac de Corral. Allí se trituraron, cuartearon y molieron, después de archivar una mitad la otra paso al laboratorio químico.

IV.1.3.3.- ANÁLISIS BÁSICOS Y DE CONTROL.-

Las muestras básicas y de control fueron analizadas por la metodología usual para los silicatos y carbonatos. Se realizaron un total de 394 análisis de control, distribuidas entre los laboratorios del CIPIMM, José Isaac del Corral, Elio Trincado F., Sectia – Lianti – Azbaciment (Rumania) y Veb – Zementanlagenbak (Dessau, RDA). Del total de análisis de control solo el 23.5 % presentaron diferencias, con los análisis básicos, fuera de lo permisible. Este valor se encuentra dentro del rango permisible según el reglamento para la evaluación de yacimientos minerales no – metálicos, vigente en Praga a partir de 1962.

IV.1.4.- LÍMITES FÍSICOS DEL MODELO GEOLÓGICO DEL SECTOR DEL YACIMIENTO UTILIZADO.-

Los límites físicos del modelo geológico del sector del yacimiento escogido, se obtuvo basándose en las secciones verticales transversales y teniendo en cuenta el diseño de polígonos que envuelve la zona de calizas en cada perfil o corte. De este modo se interpretaron 17 secciones verticales transversales espaciadas a 50.0 m. Para la delimitación de los límites físicos del modelo geológico de las materias primas existentes en este sector del yacimiento, y se utilizaron las especificaciones, recogidas en la tarea técnica del proyecto minero del yacimiento, en el gráfico IV.3 se puede observar un perfil ejemplo, en este caso corresponde al corte 354200N.

♦ Caliza \Rightarrow entre 45.1 – 56.0 % de C_aO

Tabla IV-3 Secciones transversales.-

V_353850N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354300N_CALIZAS ± 25.0 m
V_353900N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354350N_CALIZAS ± 25.0 m
V_353950N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354400N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354000N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354450N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354050N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354500N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354100N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354550N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354150N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354600N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354200N_CALIZAS ± 25.0 m	V_354650N_CALIZAS ± 25.0 m
V_354250N_CALIZAS ± 25.0 m	

En el diseño de los límites físicos del modelo geológico solo tuvimos en cuenta los recursos medidos por lo que no se representan los recursos extrapolados.

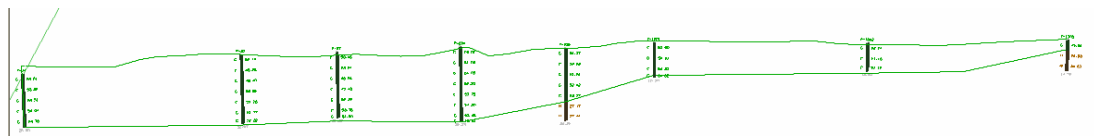


Gráfico IV-3 Límites físicos de modelo geológico. Perfil No. 354200N

IV.1.4.1.- OBTENCIÓN DEL SÓLIDO TRIDIMENSIONAL DE LOS RECURSOS.-

Para obtener el sólido tridimensional de los recursos, se procedió a unir, mediante líneas de unión del software GEMCOM (“tied polyline” como se aprecia en el gráfico IV.4), los diferentes polígonos digitalizados y luego mediante un comando llamado “Create solid from tied polyline” se obtuvo dicho sólido, que fue posteriormente cortado con el modelo digital de terreno (gráfico IV.6). El modelo tridimensional de los recursos se puede observar en el gráfico IV.5.

Los huecos que se observan en el gráfico corresponden a las intercalaciones de margas o arcillas, las cuales fueron extraídas del mismo, para que no interfirieran en el estudio de las calizas que son el objeto de estudio de este trabajo.

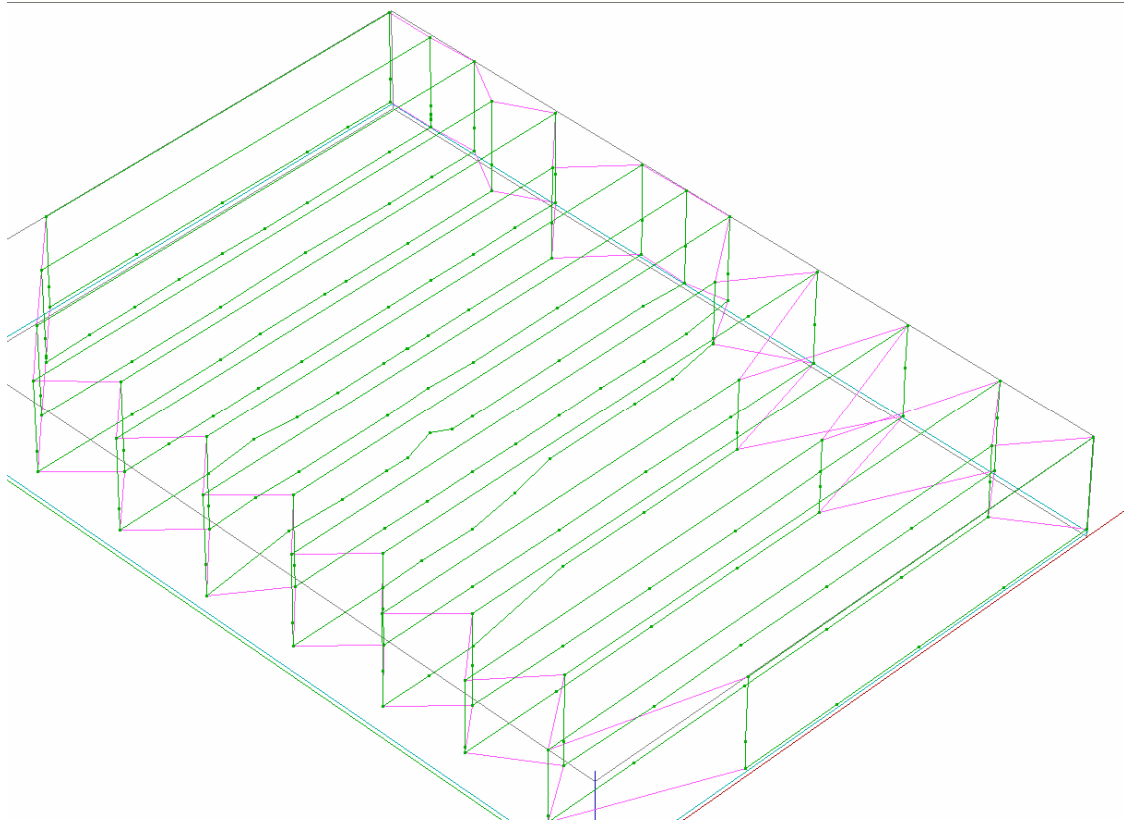


Gráfico IV-4 Tied polyline para confeccionar el sólido tridimensional.-

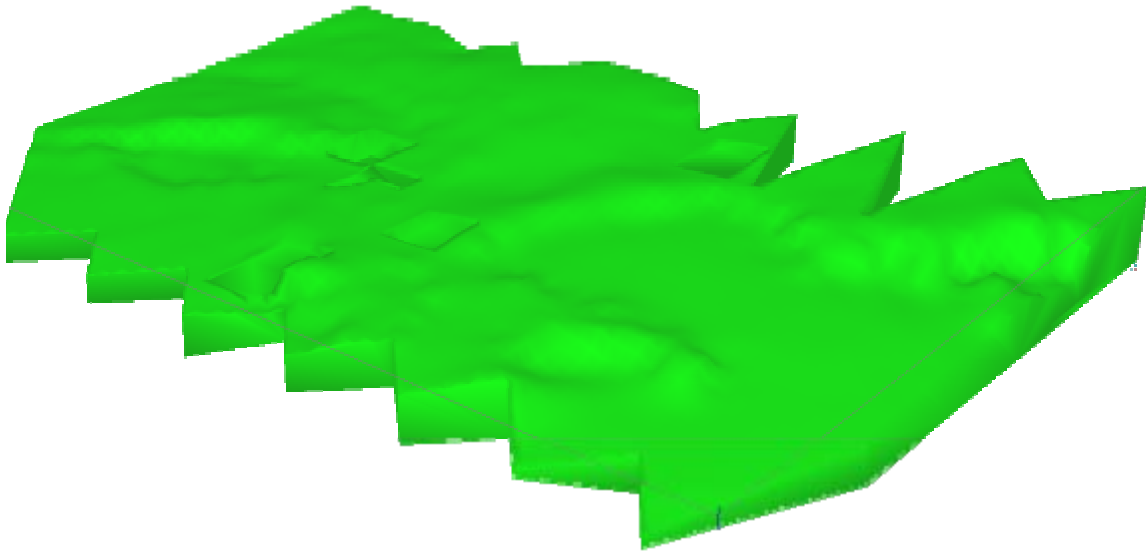


Gráfico IV-5 Sólido tridimensional de los recursos.-

IV.1.5.- MODELO DIGITAL DEL TERRENO.-

IV.1.5.1.- INTRODUCCIÓN.-

El yacimiento “Mariel” se encuentra ubicado en las coordenadas 320600 – 322600 y 352600 – 354900 en la plancheta a escala 1:50000 de la Provincia de La Habana.

Para la realización de este trabajo nos basamos en los trabajos topográficos que tuvieron como objetivos el levantamiento topográfico de 187 ha a escala 1: 1000, así como el replanteo de la propiedad minera.

Todos los trabajos fueron realizados de forma automatizada, los cálculos de todas las poligonales y sus brazos fueron realizados con el Software Topcal y la confección del plano con el Software Topo6 y AutoCAD Map Versión 2004.

Utilizamos la base topográfica concluida el 31 de agosto de 2000 y todas las actualizaciones realizadas hasta la fecha de confección de este trabajo.

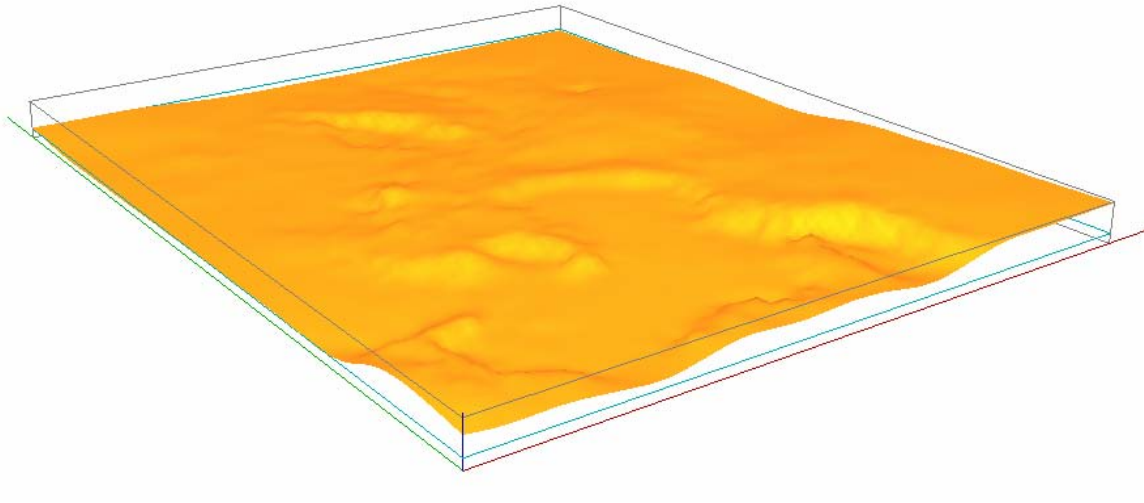


Gráfico IV-6 Modelo digital del terreno.-

IV.1.5.2.- CONFECCIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO.-

Para la confección del modelo digital del terreno (MDT) se procedió recortar del plano original el sector del trabajo que nos ocupa y luego se importó el fichero DWG con las curvas de nivel y la planimetría hacia el GEMCOM, luego se procedió salvar la información con el formato común de GEMCOM y se realizó la extracción de todos los puntos de las curvas y las líneas planimétricas, una vez obtenidos estos puntos se procedió a realizar la triangulación y luego la renderización de la superficie como se observa en el gráfico IV.6.

IV.1.6.- ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.-

El análisis exploratorio de datos consistió en un estudio de la estadística descriptiva, el carácter de la distribución de la variable en análisis, a través de los histogramas y el mapa base para estudiar la distribución espacial de los pozos.

La información base está formada por los valores de las muestras de los 124 pozos de perforación utilizados en este trabajo y que están distribuidos a o largo de perfiles este – oeste.

Teniendo en cuenta que la longitud promedio de la muestra para los 124 pozos utilizados es de 3.82 m se decidió regularizar la información usando un intervalo de 5 m.

La estadística descriptiva del componente analizado para el sector utilizado se muestra en las tablas IV-4 y IV-5, en la que la distribución es generalmente asimétrica con una cola a la izquierda.

Tabla IV-4 Estadística descriptiva del CaO.-

<i>Datos validos</i>	715
<i>Media Aritmética</i>	52.94
<i>Moda</i>	53.67
<i>Mínimo</i>	45.03
<i>Cuartil Inferior</i>	52.64
<i>Mediana</i>	53.50
<i>Cuartil Superior</i>	54.05
<i>Máximo</i>	55.15
<i>Rango</i>	10.11
<i>Varianza</i>	3.38
<i>Desviación Estándar</i>	1.84
<i>Coefficiente de variación</i>	0.03
<i>Asimetría</i>	-2.00
<i>Kurtosis</i>	4.17

Se puede observar que aunque los datos no están distribuidos normalmente, los valores de la media y la mediana son muy cercanos, el coeficiente de variación es menor que 1, no existen valores anómalos que puedan influir desfavorablemente en el análisis de variabilidad, todo lo anterior indica estacionaridad en la información, por lo que pueden ser aplicados los métodos geoestadísticos (Isaaks y Srivastava, 1989; Clark et al, 2001).

Tabla IV-5 Frecuencia acumulativa del CaO.-

Categoría	Cantidad	Cantidad acumulada	Porciento de validación	% Acumulado de validación
45.00000<x<=46.00000	7.00	7.00	0.98	0.98
46.00000<x<=47.00000	11.00	18.00	1.54	2.52
47.00000<x<=48.00000	8.00	26.00	1.12	3.64
48.00000<x<=49.00000	14.00	40.00	1.96	5.59
49.00000<x<=50.00000	23.00	63.00	3.22	8.81
50.00000<x<=51.00000	26.00	89.00	3.64	12.45
51.00000<x<=52.00000	30.00	119.00	4.20	16.64
52.00000<x<=53.00000	133.00	252.00	18.60	35.24

$53.00000 < x \leq 54.00000$	267.00	519.00	37.34	72.59
$54.00000 < x \leq 55.00000$	189.00	708.00	26.43	99.02
$55.00000 < x \leq 56.00000$	7.00	715.00	0.98	100.00
Perdidos	0.00	715.00	0.00	

Se observa muy ligeramente, la existencia de sub-poblaciones, que pueden tener una explicación geológica, en el histograma del gráfico IV-7 se observa una cola hacia la izquierda, que litológicamente pueden corresponder a intercalaciones de arcilla, marga, marga calcárea y caliza margosa hasta llegar a las muestras de caliza en el extremo derecho del gráfico. Además hay que destacar que las calizas están representadas desde el punto de vista litológico por calizas blandas, calizas coralinas, calizas recrystalizadas, calizas organógenas y calizas duras, pero como todas las clasificaciones litológicas mencionadas, se pueden agrupar en un tipo tecnológico utilizado en la estimación de recursos, se decidió no separar las poblaciones.

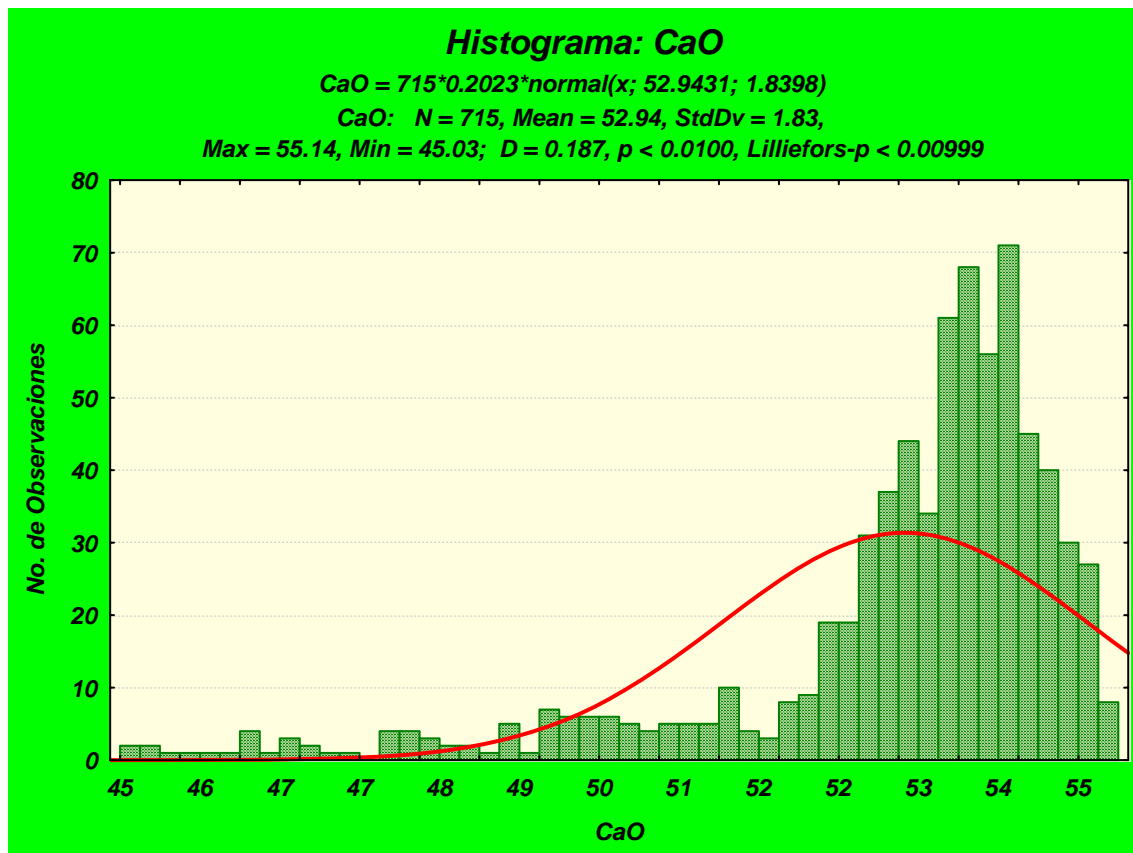


Gráfico IV-7 Histograma para el Carbonato de Calcio (CaO).-

IV.1.7.- ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS Y VARIOGRAFÍA EXPLORATORIA.-

El cálculo de los semivariogramas experimentales fue realizado con el software GeoStat v. 1.2, utilizando la información perteneciente a la población de caliza, en las tres direcciones preferenciales (según el Rumbo, el Buzamiento y a lo largo de los pozos de perforación). Estos fueron calculados utilizando los siguientes parámetros:

Tabla IV-6 Parámetros para el cálculo de los semivariogramas.-

Parámetros	Global	Rumbo (AS)	Buzamiento (DD)	Vertical (DH)
Incremento	50	50	50	5
Tolerancia lineal	25	25	25	2.5
No. de puntos	10	10	10	8
Azimet.	90	45	45	0
Tolerancia del Az.	45	22.5	22.5	10
Inclinación	0	0	0	90
Tolerancia de la Incl.	0	0	0	0

Los semivariogramas para el CaO se observan en el Gráfico IV-8.

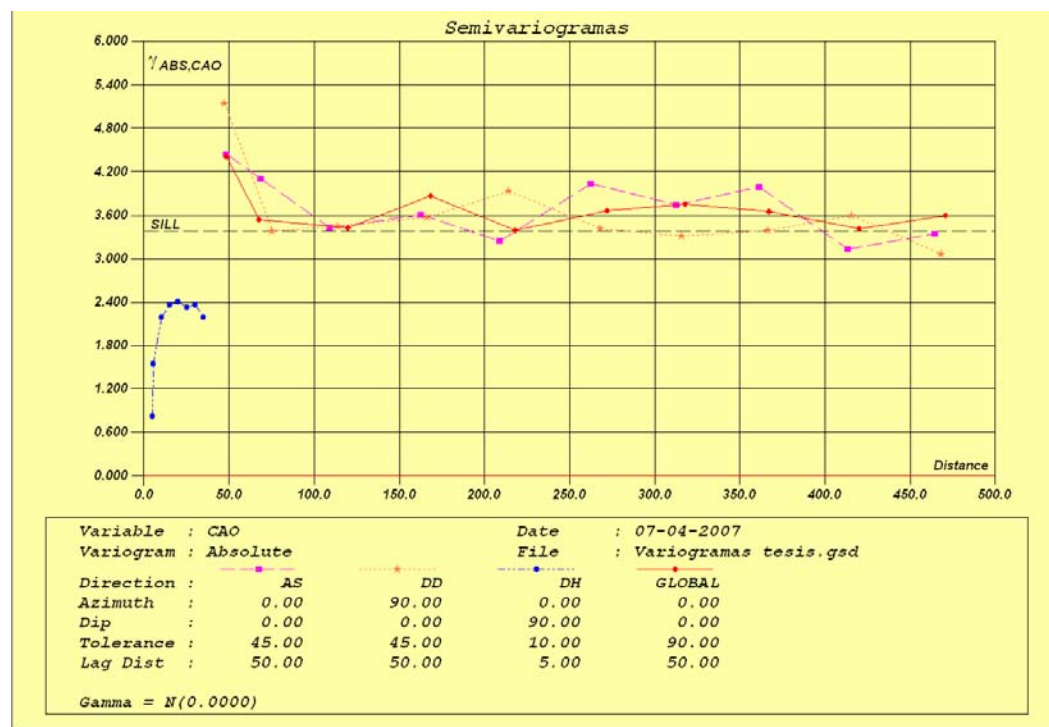


Gráfico IV-8 Semivariogramas del CaO.-

En el gráfico IV-8 se puede observar el semivariograma omnidireccional el cual no muestra muchas diferencias con respecto a los semivariogramas direccionales por el rumbo y el buzamiento, esto constata que la variable CaO presenta un comportamiento isotropito en el plano horizontal. En los semivariogramas direccionales se observan estructuras espaciales definidas en las direcciones horizontales (Rumbo y Buzamiento), en los que se alcanza la meseta en los primeros puntos del semivariograma, que impide describir el comportamiento estructural del contenido de CaO a pequeñas distancias, los mismos muestran aparentemente la existencia de efecto de pepita puro, no siendo así en el semivariograma según la dirección vertical el cual no muestra efecto de pepita. Lo anterior indica que la red de exploración utilizada para el estudio de este sector del yacimiento no permite describir el comportamiento de la variabilidad espacial a distancias cercanas al origen en el plano horizontal. Concluyendo finalmente la existencia de una anisotropía geométrica entre el plano de la mineralización y la dirección vertical.

Como los semivariogramas direccionales no muestran diferencias en el comportamiento espacial, se decidió utilizar el semivariograma omnidireccional para realizar el ajuste, conjuntamente con el semivariograma en la dirección vertical o a lo largo de los pozos. Esto justificado además, por lo explicado en el epígrafe IV.1.4. El ajuste y el modelo estructural obtenido se presentan en el gráfico IV.9.



Gráfico IV-9 Semivariograma de CaO ajustado y modelo estructural obtenido.-

IV.1.8.- MODELO DE RECURSOS.-

Para la estimación de los recursos del yacimiento se utilizó varios modelos de bloques con las siguientes características:

Tabla IV-7 Características de los modelos de bloques.-

Modelos	Dimensiones del bloque (metros)	Dimensiones de los sub – bloques (metros)	Cantidad de boques		
			X	Y	Z
Modelo 1	10*10*10	3.33*3.33*3.33	61	82	6
Modelo 2	15*15*10	5.00*5.00*3.33	41	55	6
Modelo 3	20*20*10	6.66*6.66*3.33	31	41	6
Modelo 4	25*25*10	8.33*8.33*3.33	25	33	6
Modelo 5	30*30*10	10.00*10.00*3.33	21	28	6
Modelo 6	35*35*10	11.66*11.66*3.33	18	24	6
Modelo 7	40*40*10	13.33*13.33*3.33	16	21	6
Modelo 8	45*45*10	15.00*15.00*3.33	14	19	6
Modelo 9	50*50*10	16.66*16.66*3.33	13	17	6

El origen de coordenadas para todos los modelos utilizados en el trabajo fue el siguiente: $X= 321690.00$, $Y=354840.00$ y $Z=65.00$; Los tamaños de los bloques, se seleccionaron sobre la base de tomar, desde $1/5$ de la red de perforación (10.0 metros) hasta las dimensiones del tamaño promedio de la red (50.0 metros), por la horizontal y el tamaño del banco de explotación por la vertical, que para este caso fue tomado 10.0 metros. Para la estimación se utilizó un sistema de sub – bloques dividiendo los bloques a razón de $3 \times 3 \times 3$ en las tres direcciones del espacio, X, Y, y Z.(Jounel y Huijbrets, 1978) Esto se hizo para lograr la estimación de bloque del Krigeaje. Las dimensiones que alcanzaron los bloques y los sub – bloques, así como la cantidad de bloques en las tres direcciones del espacio se pueden observar en la tabla IV.7

En cada modelo se crearon las siguientes variables: CaO para la estimación por Krigeaje; CaO_VAR_KRIG para la varianza de Krigeaje; CaO_SIM para la variable simulada y

CaO_VAR_SIM para la varianza de los promedios móviles de la simulación; Una representación del modelo de bloques se puede observar en el gráfico IV.10.

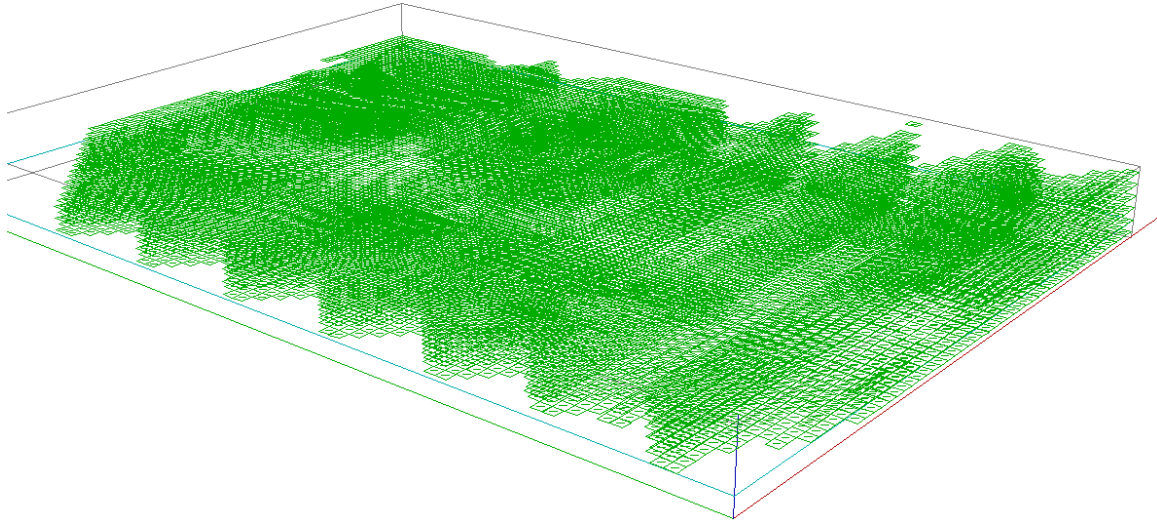


Gráfico IV-10 Modelo de bloques.-

IV.1.8.1.- METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN.-

La variable bajo estudio fue estimada utilizando el Krigeaje ordinario, teniendo en cuenta el modelo obtenido para el CaO en la variografía. El elipsoide de búsqueda utilizado para la estimación del componente fundamental CaO fue de 160.0 m, 160.0 m y 40 m en las direcciones X, Y y Z respectivamente, lo que permite localizar para la estimación por Krigeaje datos suficientes, utilizando como mínimo 2 y un máximo de 24 muestras dentro del volumen de búsqueda. Aquellos bloques que no fueron estimados con el elipsoide mencionado anteriormente se evaluaron utilizando un elipsoide 2 veces mayor que el anterior.

De esta forma se procedió a la estimación de los 9 modelos de bloques definidos en la tabla IV.7. Los resultados de la estimación se utilizarán posteriormente para comparar con posibles datos reales.

IV.1.8.2.- PARÁMETROS DE LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS.-

- **Peso volumétrico.-**

En la estimación de los recursos se utilizo el peso volumétrico de las calizas que varía desde 1.65 – 2.69 t/m³ con un promedio de 2.09 t/m³

IV.2.- APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA.-**IV.2.1.- INTRODUCCIÓN.-**

El sector utilizado para realizar la simulación, de la variable CaO, es más pequeño que el área de los datos, y esta situado en la cota +15.0 m S.N.M.M., se puede localizar en las coordenadas planas de la tabla IV.8 y visualizar en el gráfico IV.11.

Tabla IV-8 Coordenadas del sector simulado.-

$X_{min}= 321690.00$	$X_{max}= 321995.00$
$Y_{min}= 354240.00$	$Y_{max}= 354470.00$
$Z_{min}= 15.00$	$Z_{max}= 25.00$

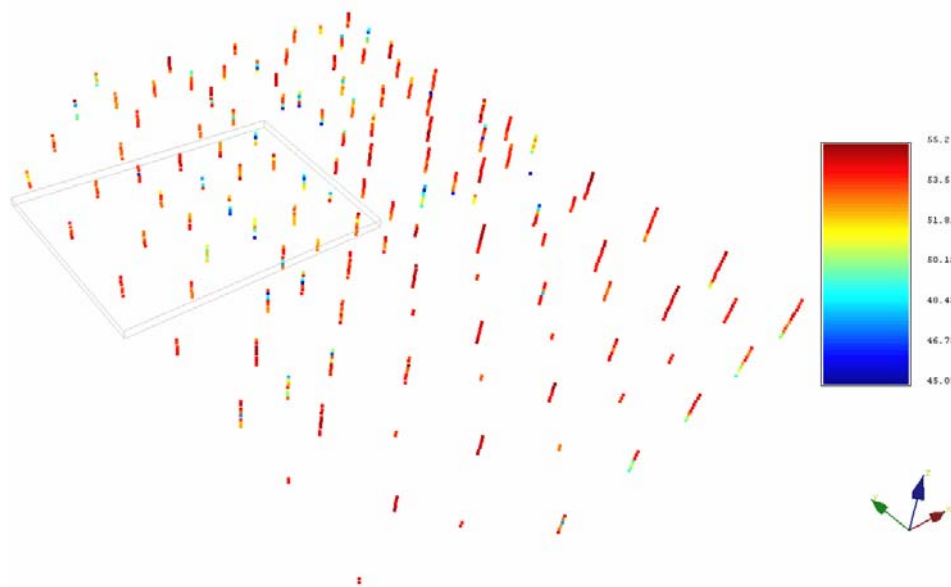


Gráfico IV-11 Área escogida para la simulación secuencial gaussiana.-

Para obtener una representación equivalente a la realidad de este sector del depósito, se utilizó la simulación geoestadística con el método de la simulación secuencial gaussiana, la cual aporta una herramienta útil para reproducir la distribución espacial de los datos (Carrasco y Jara, 1998). Esta consiste, en generar primero, valores con iguales características de dispersión que los datos originales, lo que se alcanza a través de la simulación no condicional y posteriormente condicionar los valores obtenidos a los datos reales, esto es la Simulación Condicional. De esta forma se obtiene una de las posibles realizaciones del sector bajo estudio, del cual, la información real también es considerada como una realización.

Para realizar esta simulación utilizamos dos softwares llamados S-GeMS v. 1.4 y GSLib 90, para calcular los promedios móviles utilizamos un programa llamado Celda 3D v. 1.0 (Arias, 2006), con estos dos programas no dimos a la tarea de obtener valores simulados y promediados para cada tamaño de celda utilizado en los modelos descritos en el capítulo anterior.

IV.2.2.- NORMALIZACIÓN DEL HISTOGRAMA.-

Para obtener una simulación de los datos en el sector mencionado utilizamos el método de la simulación secuencial gaussiana, los datos deben responder a una población normal y como se observa en el histograma del gráfico IV.7, la cual presenta una cola hacia la izquierda, para lograr normalizar el histograma, se utiliza el semivariograma ajustado a los datos normalizados, pero en la práctica es lo mismo que normalizar la mesetas, es decir, sumamos las mesetas de todas las estructuras, y se busca lo que representa cada meseta individual del total, teniendo en cuenta que la suma de estos valores tiene que ser igual a uno. Los alcances se mantienen con los valores originales que se obtienen en el análisis estructural.

IV.2.3.- PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN SECUENCIAL GAUSSIANA.-

A continuación se presentan los parámetros utilizados para la simulación, lo cual es el fichero de parámetro de la S-GeMS (Remy, 2004), sistema que utiliza la librería geoestadística GsLib (Deutsch, 1998). La simulación se realizó en una red de 1x1x1m utilizándolas característica de variabilidad y correlación espacial obtenidas anteriormente.

```

<parameters> <algorithm name="sgsim" />
  <Grid_Name value="Grid_CAO cota 25" />
  <Property_Name value="Simula_CAO" />
  <Nb_Realizations value="1" />
  <Seed value="14071789" />
  <Kriging_Type value="Simple Kriging (SK)" />
  <Assign_Hard_Data value="1" />
  <Hard_Data grid="Simulacion" property="CAO" />
  <Max_Conditioning_Data value="12" />
  <Search_Ellipsoid value="80 70 60
  <Angles values search ellipsoid=0 0 0" />
  <Use_Target_Histogram value="1" />
  <nonParamCdf ref_on_file = "0" ref_on_grid = "1"
filename = "" grid = "Simulacion" property = "CAO">
  <LTI_type function = "Power" extreme = "45.034" omega = "3" />
  <UTI_type function = "Power" extreme = "55.2" omega = "0.333" />
</nonParamCdf>
  <Variogram nugget="0" structures_count="2" >
    <structure_1 contribution="0.69" type="Exponential" >
      <ranges max="12" medium="10" min="8" />
      <angles x="0" y="0" z="0" />
    <structure_2 contribution="0.31" type="Spherical" >
      <ranges max="80" medium="70" min="60" />
      <angles x="0" y="0" z="0" />

```

En la figura IV.12 se muestra una representación en tres dimensiones de los resultados de la simulación secuencial gaussiana en la que se refleja el comportamiento real de los datos, a diferencia de los resultados obtenidos por estimación que siempre proporcionan una imagen suave de la realidad que se estudia.

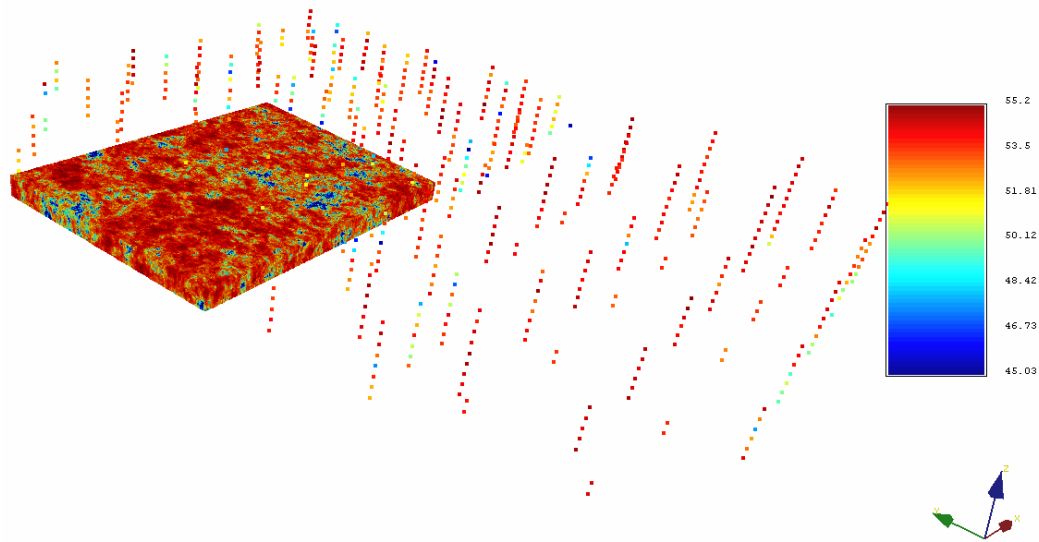


Gráfico IV-12 Representación en 3D de los resultados de la simulación.-

IV.2.4.- VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA.-

A continuación procedemos a comprobar la validez de la simulación geoestadística con el objetivo de demostrar que posee las mismas características de dispersión de los datos originales y por tanto es representativa de la realidad estudiada. Para esto mostramos una comparación de la estadística básica entre los datos reales y los datos simulados. Los histogramas del gráfico IV.9 muestran igual comportamiento y los estadígrafos de la tabla IV.9 presentan valores similares.

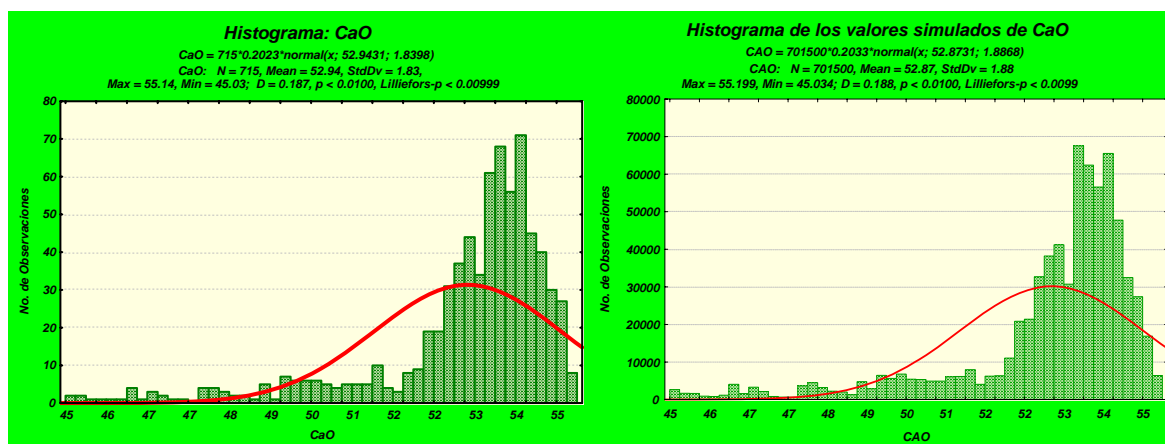


Gráfico IV-13 Comparación entre los histogramas de los datos reales y los simulados para el CaO.-

Tabla IV-9 Tabla de comparación de los estadígrafos de los datos reales y los simulados.-

Datos Reales		Datos Simulados	
Datos validos	715	Datos válidos	701500
Media Aritmética	52.94	Media Aritmética	52.87
Mediana	53.50	Mediana	53.50
Suma	37854.35	Suma	37090461.3
Mínimo	45.03	Mínimo	45.03
Máximo	55.15	Máximo	55.19
Percentil 10	50.27	Percentil 10	50.08
Percentil 90	54.51	Percentil 90	54.47
Rango	10.11	Rango	10.16
Varianza	3.38	Varianza	3.55
Dev. Estándar	1.84	Dev. Estándar	1.88
Skewness	-2.00	Skewness	-1.94
Kurtosis	4.17	Kurtosis	810.02

La figura IV.14 muestra los semivariogramas de los datos reales y simulados, en los mismos se aprecia igual comportamiento de la variabilidad espacial. Estos tres elementos presentados permiten asegurar que hemos obtenido una realización representativa de la realidad estudiada. Los resultados de cualquier procesamiento que se realice sobre la misma serían similares a los que se obtendrían si se utilizaran los datos reales.

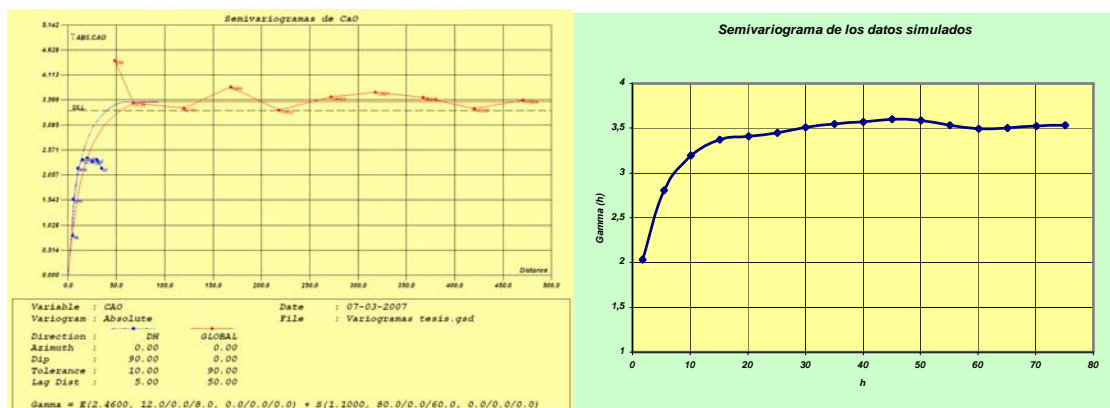


Gráfico IV-14 Semivariogramas de los datos reales y los simulados.-

IV.2.5.- POSIBLES DATOS REALES.-

La simulación obtenida anteriormente es suficientemente densa para promediar los datos por cada tamaño de USM según los modelos geométricos confeccionados y de esta forma proponer un posible dato real por cada bloque que pueda ser comparado con los correspondientes valores estimados

IV.3.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.-

Para la comparación se utilizó fundamentalmente el error cuadrático medio. La figura IV.15 muestra un nomograma del promedio de los errores cuadráticos medios versus tamaños de unidades de selección minera. En la misma se puede observar que no existe un comportamiento lineal de los errores. Presenta errores mínimos, primero para un tamaño de 25 m y posteriormente para otros valores cercanos a tamaño de la red de exploración. Este mismo razonamiento se puede hacer para el error porcentual y el error medio.

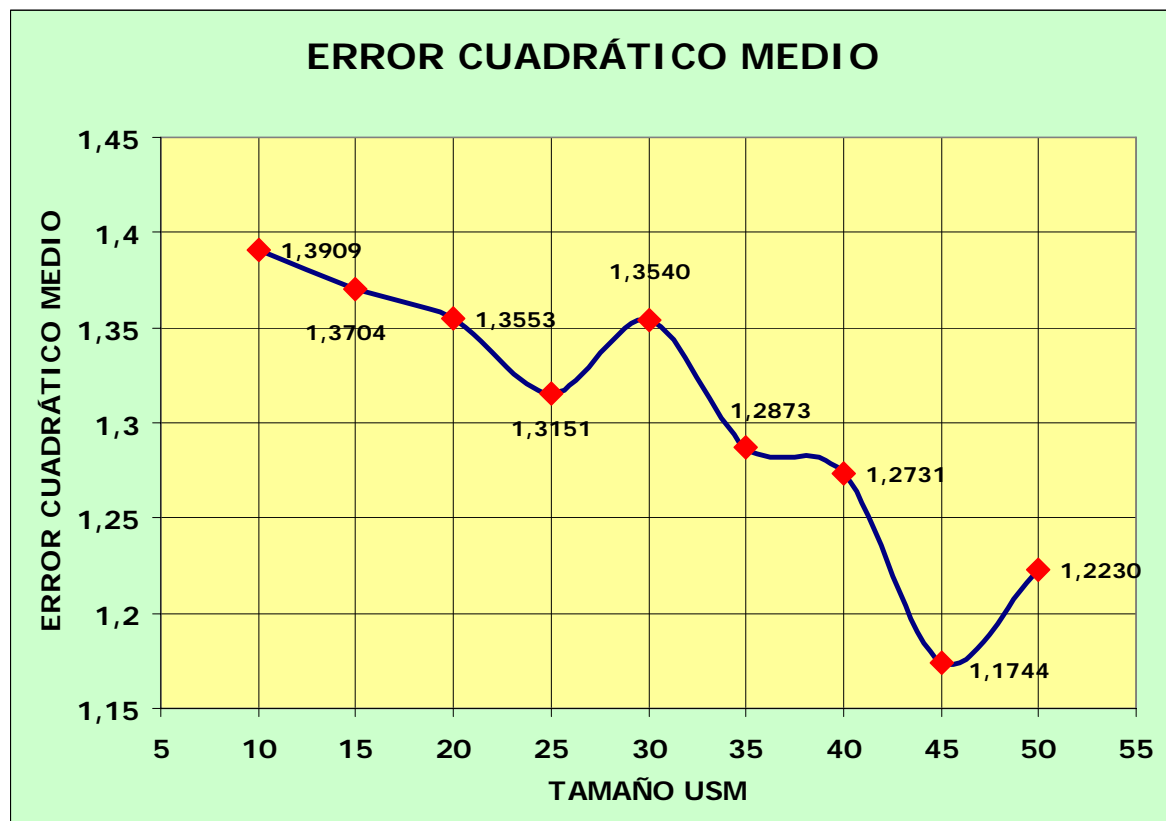


Gráfico IV-15 Error cuadrático medio.-

Los errores anteriores nos permiten valorar sólo las diferencias en la exactitud para los diferentes tamaños de USM. Ahora, si analizamos las diferencias de la estimación por Krigeaje de los contenidos promedios globales para el sector estudiado contra los obtenidos por promedios móviles a partir de la simulación, considerados posibles datos reales, obtenemos la curva que se muestra en la figura IV.16. Donde se observa un

comportamiento similar al análisis realizado anteriormente, en este caso nos referimos a la precisión de los cálculos.

Queda de esta forma demostrada la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación.

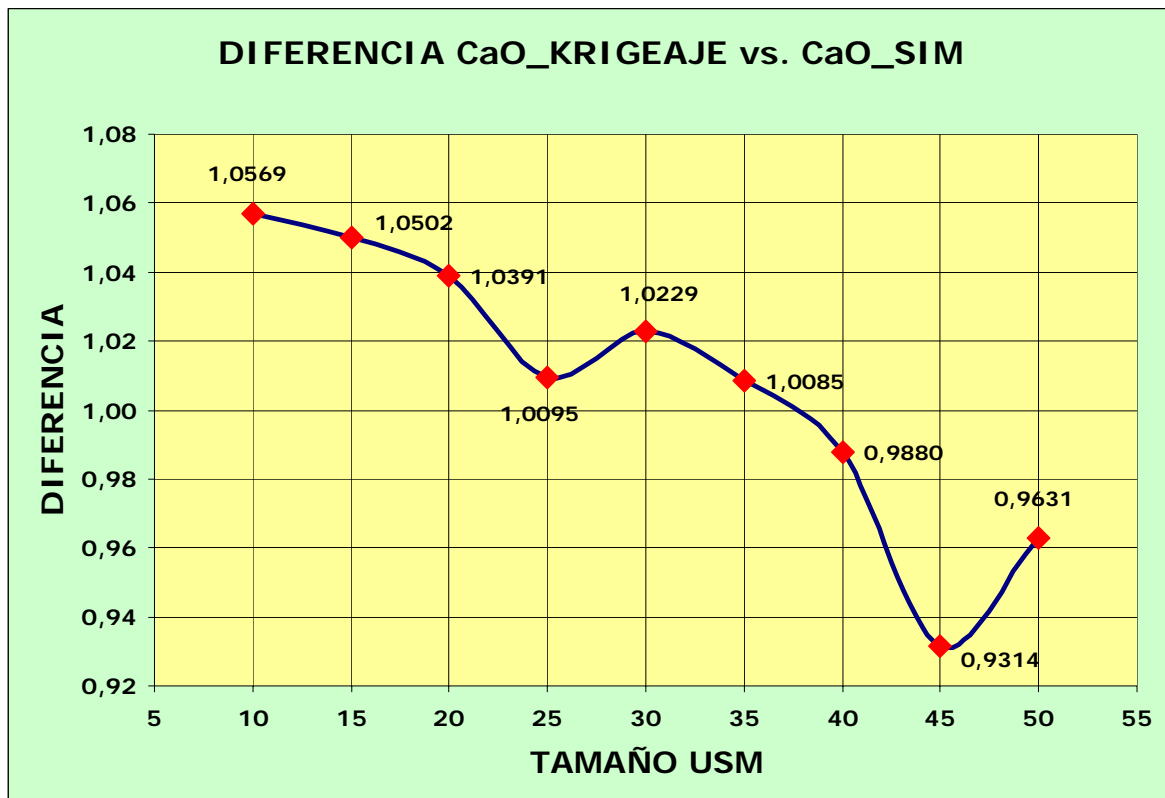


Gráfico IV-16 Diferencias entre valores estimados por Krigeaje vs. promedios móviles de la Simulación.-

IV.4.- CONCLUSIONES.-

Durante el desarrollo de esta investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1.- Se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema, considerando que no existen suficientes trabajos relacionados con la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos minerales in situ. Lo cual se demuestra porque tanto en el ámbito nacional como internacional no existen artículos que se refieran directamente a este aspecto tan importante.*
- 2.- Se elaboró una metodología que utiliza procedimientos conjuntos de estimación y simulación geoestadística para demostrar la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos minerales in situ, la cual es aplicable tanto para yacimientos minerales sólidos metálicos como no metálicos.*
- 3.- Se aplicó la metodología al yacimiento de materia prima para cemento “Mariel” llegando a la conclusión de que en efecto existe influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos minerales in situ.*
- 4.- Se completó un estudio bastante detallado de las características variabilidad y correlación espacial de los datos seleccionados como patrón, obteniéndose un modelo estructural de variabilidad espacial para el CaO, que servirá de base para la realización de la estimación y la simulación geoestadística.*
- 5.- Se construyeron 9 modelos de bloques, estimando cada celda por Krigeaje ordinario de bloque, además se almacenó la varianza de Krigeaje y la cantidad de muestras con que fueron estimados cada uno de los bloques o USM.*
- 6.- Se simuló en una red de 1x1x1 los contenidos de CaO considerando que son representativos de la realidad al poseer iguales características de dispersión que los datos reales.*
- 7.- Se propuso un valor real para cada modelo de bloque que se corresponde con los 9 modelos creados utilizando los resultados de la simulación y el método de promedios móviles.*

- 8.- *Se compararon los posibles valores reales con los estimados obtenidos por Krigeaje a través del error cuadrático medio, el error porcentual y el error medio llegando a la conclusión de que para el tamaño de 25x25x10 m se logran errores mínimos así como para tamaños de USM cercanos a la distancia de la red de exploración.*
- 9.- *Se compararon también las estimaciones de recursos globales para cada modelo de bloque en el sector estudiado, observando que existe una diferencia mínima para el tamaño de USM de 25x25x10 m.*
- 10.- *Todo lo anterior demuestra la influencia del tamaño de la USM en la precisión y exactitud de la estimación de los recursos minerales in situ.*

IV.5.- RECOMENDACIONES.-

1. *Recomendamos aplicar el procedimiento propuesto a otros casos de estudio que incluya minerales sólidos metálicos y no metálicos.*
2. *Desarrollar tesis en opción del título de ingeniero geólogo con estudiantes finalistas de la Universidad de Pinar del Río sobre el tema abordado en este trabajo.*
3. *Publicar los resultados en revistas nacionales e internacionales.*
4. *Continuar la investigación para completar el procedimiento de forma más rigurosa al incluir otros elementos de carácter objetivos y subjetivos como son estudios de redes, cambio de soporte, control geológico, dimensión del equipamiento minero, escala de la producción, alturas de los frentes de explotación y valor de los recursos in situ.*

BIBLIOGRAFÍA.-

Arias, J., 2006, CELDA 3D v. 1.0, Instrucciones para el usuario.

Arik, A., 1990, *Effects of Search Parameters on Kriged Reserve Estimates*, *International Journal of Mining and Geological Engineering*, Vol. 8, No.12, p.305-318.

Armstrong, M., y Roth, C., 1997, *Notas de clases del curso Geoestadística Lineal, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Curso: 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.*

Armstrong, M., y Carignan, J., 1997, “*Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.*”, École de Mines de Paris, 112 p., “*Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.*”, École de Mines de Paris, 112 p.

Bacchi, B., y Kottegoda, N.T., 1995, *Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns of Rainfall*, *Journal of Hydrology* 165, Elsevier Science B.V., p.311-348.

Bustillo, R. M., López Gimeno, C. Ruiz Sánchez-Porro, J. & García Bermúdez, P., 2000, *Manual de Aplicaciones Informáticas en Minería. Gráficas Arias Montano S. A., Madrid, España. 381 pp.*

Carr, J.R., 1995, *Numerical Analysis for the Geological Sciences*, Prentice Hall Inc, 592 p.

Chica-Olmo, M., 1987, *Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 387 p.

Christakos, G., y Raghu, V.R., 1996, *Dynamic Stochastic Estimation of Physical Variables*, *Mathematical Geology*, Vol. 28, No. 3, p. 34-365.

Christensen, R., 1993, *Quadratic Covariance Estimation and Equivalence of Predictions*, *Mathematical Geology*, Vol. 25, No. 5, p.541-558.

Clark, I. & Harper, W. V., 2001, *Practical geostatistics. Second Edition*, Ecosse North America Llc, publishers. Kinkos, Westerville, Ohio USA. 318 pp.

Cressie, N., y Grondona, M.O., 1992, *A Comparison of Variogram Estimation with Covariogram Estimation*, *The Art of Statistical Sciences*, Chapter 15, p.191-208.

Cuador Gil, J. Q., 2002, *Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo - industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda*, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UPR, Pinar del Río.120 p.

Cuador Gil, J. Q. y Quintero, A., 1999, *Análisis estructural: punto de partida de todo estudio geoestadístico*. *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 3, pp. 16-22.

- Cuador-Gil, J.Q., Quintero, A., y Estévez, E., 2000**, *La simulación condicional en Geoestadística. Revista Minería y Geología*, Vol. XVII, No.1, pp 47-50.
- Cuador-Gil, J. Q. y Quintero, A., 2001**, *Simulación condicional de variables regionalizadas y su aplicación al comportamiento de la porosidad efectiva en un yacimiento fracturado – poroso*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, ISSN: 1405-3322, Tomo LIV, pp 19-27.
- David, M., 1977**, *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier, Amsterdam, 364 p.
- Deutsch, C.V., 1994**, *Kriging With String of Data*, *Mathematical Geology*, Vol. 26, No.5, p.623-638.
- de Fouquet, C, 1996**, *Quelques Rappels Sur les Méthodes Géostatistiques*, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, Fontainebleau, France, 4 p.
- Deutsch, C.V., y Journel, A.G., 1998**, “*GSLIB: Geostatistical Software Library and User’s Guide*”, Second Edition, Oxford University Press, 369p.
- Dubrule, O., 1994**, *Estimating or Choosing A Geostatistical Model*, R. Dimitrakopoulos (de.), *Geostatistics for the Next Century*, p. 3-14.
- Echaabi, J., Trochu, F., y Gauvim, R., 1995**, *A General Strength Theory for Composite Materials Based on Dual Kriging Interpolation*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.14, p.211-232.
- GEMCOM System, 2000**, *User’s Manual*, 92 p.
- Geostat Systems Internacional Inc., 2002**, *VARIO 3 Statistics and Variograms*, User’s Manual, 58 p.
- Glacken, I. M., 2001**, *Change of support and use of economic parameters for block selection*. Department of Geological and Environmental Sciences Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, USA.
- Host, G., Omre, H., y Switzer, P., 1995**, *Spatial Interpolation Error for Monitoring Data*, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 90, No. 431, p. 853-861.
- Isaaks, E. H y Srivastava, R.M., 1989**, *Applied Geostatistics*, New York Oxford, Oxford University Press, 561p.
- Journel, A, G. y Huijbregts, C. J., 1978**, *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York, 600 p.
- Kiyono, J., y Suzuki, M., 1996**, *Conditional Simulation of Stochastic Waves by Using Kalman Filter and Kriging Techniques*, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, June 23-28, 8 p.

- Lajaunie, C., 1997**, *Iterative Cross Validation*, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, France, 8p.
- Lantuéjoul, Ch., 1997**, *Iterative Algorithms for Conditional Simulation*, E.Y.Baafi and N.A. Schofields (eds) *Geostatistics Wollongong'96*, Volume 1, p 27-40.
- Lantuéjoul, Ch., 1998**, *Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Curso 1997-98*, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Madani, H., 1998**, *Geostatistical Ore Reserves Estimation of Mehdiarad Barite Mine, Iran*, Journees de Geostatistique, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 25 et 26 Mai 1998, 7p.
- Matheron, G., 1970**, “La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications” *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5*, Ecole de Mines de Paris, 212 p. ok
- Maksimov, A., Miloserdina, G. & Eriomin, N., 1973**, *Breve curso de prospección geológica*. Editorial MIR, Moscú. pp. 229 – 244.
- Martínez, A., 2006**, *Comunicación personal por correo electrónico*. Instituto Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba
- Quintero Silverio, A. & Cuador Gil, J. Q., 2000**, *Análisis Estructural de la Porosidad Efectiva en el Horizonte Tobas Fina del Yacimiento Pina, Ciego de Avila*. Revista Minería y Geología. Vol. XVII, Nos. 3-4, pp 19-22.
- Quintero Silverio, A., 2001**, *Empleo de los métodos geoestadísticos y probabilísticos en el cálculo de reservas de petróleo en campos fracturado - porosos. (caso de estudio: campo petrolífero de Pina)*, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UPR, Pinar del Río.
- Remy, N., 2004**, *Geostatistical Earth Modeling Software (SGeMS): User's Manual*, 87 p.
- Rivoirard, J., 1998**, *Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Cursos: 1995-96 y 1997-98*, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Rossi, M. E., 2006**, *Comunicación personal por correo electrónico*. GeoSystems International.
- Sahin, A. Y Hassan, H.M., 1998**, *Enhancement of Permeability Variograms Using Outcrop Data*, *The Arabian Journal for Sciences and Engineering*, Vol. 23, No. 1C, p. 137-144.

- Schaug, J., Iversen, T., y Pedersem, U., 1993**, *Comparison of Measurements and Model Results for Airborne Sulphur and Nitrogen Components with Kriging, Atmospheric Environment*, Vol.27A, No. 6, p.831-844.
- Segobia, R., 2001**, *Geoestadística avanzada. Notas del curso de postgrado DATAMINE STUDIO v. 3.0*, RS Consultores Ltda., Chile, Empresa Cementos Curasao, S.A.
- StatSoft, Inc., 2001**, *STATISTICA 6.0. Electronic User's Manual*.
- Tulcanaza, E., 2000**, *Evaluación de Recursos y Negocios Mineros. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Impresos Universitarios, S. A., Chile. 347 pp.*
- Wackernagel, H., 1995**, "Multivariate Geostatistic, an Introduction with applications.", Berlin: Springer, 256 p.
- Weerts, H.J.T. y Bierkens, M.F.P., 1993**, *Geostatistical Analysis of Over Bank Deposits of Anatomising and Meandering Fluvial Systems; Rhine-Meuse Delta, The Netherlands, Sedimentary Geology*, 85, Elsevier Sciences Publishers B.V., p. 221-232.